

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Měření a zpracování velikosti dešťových kapek distrometrem pro predikci
útlumu deštěm satelitních spojů

Bc. Jiří Kukla

Diplomová práce

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří Kukla**
Osobní číslo: **I15165**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a řídicí technologie**
Název tématu: **Měření a zpracování velikosti dešťových kapek distrometrem pro predikci útlumu deštěm satelitních spojů**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Zpracujte data z videodistrometru (který se nachází v Akademii věd v Praze) do formy jednodominutových spekter kapek a najděte jejich vhodnou analytickou aproximaci (exponenciální, Gamma, logaritmicornální, či jiné rozložení). Ze spekter kapek vypočtete tyto čtyři veličiny: 1. intenzitu srážek, 2. měrný útlum mikrovlnného spoje způsobený deštěm, 3. faktor radarové odrazivosti, 4. kinetickou energii padajících kapek a nalezněte vztah mezi těmito veličinami. Spočítaný měrný útlum družicového spoje porovnejte s útlumem měřeným na experimentálním družicovém spoji v Akademii věd v Praze.

Rozsah grafických prací: dle potřeby, orientačně 20 grafů

Rozsah pracovní zprávy: 50 - 70 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

O. Fišer: Interakce elektromagnetického pole s dešťovým prostředím se zřetelem na predikci útlumu deštěm družicových spojů v pásmech nad 10 GHz.

Kandidátská disertační práce, FEL ČVUT, 1986

Recommendation ITU-R P.838-2. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. (Question ITU-R 201/3), 2003

Recommendation ITU-R P.311-14 Acquisition, presentation and analysis of data in studies of radiowave propagation, 2013

M. Yamada, Y. Karasawa, M. Yasuna, B. Arbesser-Rastburg: An improved prediction method for rain attenuation in satellite communications operating at 10-20 GHz, Radio Science, Volume 22, Number 6, pp. 1053-1062, November 1987

Fišer O.: Zpracování srážkoměrných údajů pro účely výzkumu šíření. PTT Revue 5/1982

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Ondřej Fišer, CSc.

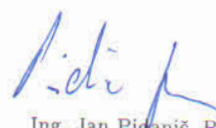
AV ČR, Ústav fyziky atmosféry

Datum zadání diplomové práce: 31. října 2016

Termín odevzdání diplomové práce: 12. května 2017



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan



Ing. Jan Pídaníč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2016

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 15. 5. 2018

Jiří Kukla

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Ondřej Fišerovi, CSc. za cenné rady a informace, a to nejen teoretické, které mi pomohly při řešení a realizaci tohoto projektu. Dále bych rád poděkoval zaměstnancům Ústavu fyziky atmosféry v Praze, kteří mi byli nejednou nápomocni při řešení problémů a práci na videodistrometru.

ANOTACE

V této diplomové práci jsem se zabýval účinky deště (dešťových kapek) na radiokomunikace, zejména měrným útlumem mikrovlnného spoje a faktorem radarové odrazivosti. Měření deště jsem prováděl na videodistrometru v Ústavu fyziky atmosféry v Praze. Výsledky měření jsem zpracoval do formy jednodominutových spekter dešťových kapek, ze kterých jsem dále vypočítal relevantní veličiny, na kterých jsou zkoumané problémy přímo závislé nebo jsou potřeba k jejich výpočtu. Například se jedná o kinetickou energii dešťových kapek, intenzitu srážek, momenty spektra atd. Dále jsem hledal vhodnou analytickou aproximaci těchto spekter kapek, přičemž zkoumaná rozložení pravděpodobnosti byla typu Exponenciální, Marshall-Palmer a Gamma. Na závěr jsme provedli porovnání útlumu z dat videodistrometru a útlumu, detekovaného z přijímací stanice družice Alphasat.

KLÍČOVÁ SLOVA

Videodistrometr, dešť, kapka, útlum, spektrum, aproximace.

TITLE

Distrometer rain drop size measurement and processing to predict rain attenuation on satellite links.

ANNOTATION

This master thesis is about the effects of the raindrops on the radiocommunication. It mainly concerns the specific attenuation of the microwave relay system and the factor of the radar reflectivity. Measurements of the raindrops were obtained from the videodistrometer, which is situated in Prague (IAP CAS). The measurements were processed into one-minute spectra of the raindrops. The spectra were used to calculate several relevant variables such as kinetic energy of the raindrops, rain rate, and spectral moments. In the thesis, three analytical approaches were tested on the spectra. The tested approaches were based on Exponential, Marshall-Palmer, and Gamma distributions. At the end of this thesis the rain attenuation, calculated from data of videodistrometer was compared with the rain attenuation measured by Alphasat satellite receiver.

KEYWORDS

Videodistrometer, rain, raindrop, attenuation, spectrum, approximation.

OBSAH

Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	12
Seznam zkratk	13
Úvod	14
1 STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	15
2 RADIOKOMUNIKACE	17
2.1 Význam radiokomunikací	17
2.2 Směrové spoje	18
2.2.1 Radioreléový spoj	18
2.2.2 Družicový spoj	19
2.3 Atmosférický útlum	20
2.3.1 Přímý atmosférický útlum:	20
2.3.2 Nepřímý atmosférický útlum:	20
2.4 Útlum hydrometeory	21
2.5 Útlum vodní párou a oblaky	22
3 DÉŠŤ	23
3.1 Popis deště	23
3.2 Typologie dešťů	24
3.3 Vybrané testovací metody pro určení typu deště	24
3.3.1 Metoda A – Tokay-Shortova	25
3.3.2 Momentová metoda W	25
3.4 Popis dešťové kapky	26
3.5 Spektrum dešťových kapek	28
4 DISTROMETR	29
4.1 Elektromechanický distrometr	30
4.2 Optický distrometr	30

4.3	1D Videodistrometr	31
4.4	2D Videodistrometr	32
4.5	Popis zařízení.....	32
4.6	Data z videodistrometru.....	35
4.7	Kalibrace	36
5	ZPRACOVÁNÍ DAT Z VIDEODISTROMETRU	38
5.1	Implementace dat do MATLABU	38
5.2	Výpočet relevantních veličin	40
5.2.1	Analýza bodových grafů.....	43
5.3	Výpočet objemových a plošných spekter kapek.....	44
5.3.1	Jednominutové plošné spektrum N_p	44
5.3.2	Jednominutové objemové spektrum $N(D)$	45
5.4	Průměrná denní plošná a objemová spektra	46
5.4.1	Průměrné denní plošné spektrum.....	47
5.4.2	Průměrné denní objemové spektrum	49
5.5	Výpočet momentů spektra DSD	50
6	ANALYTICKÉ APROXIMACE DSD	53
6.1	Exponenciální model $N(D)$	53
6.2	Marshall-Palmer model $N(D)$	54
6.3	Gamma model $N(D)$	54
7	VÝPOČTY PRO RŮZNÉ TYPY DEŠŤŮ	57
8	VÝPOČET MĚRNÉHO ÚTLUMU	60
8.1	Rozptylová funkce	60
8.2	Realizace výpočtu měrného útlumu.....	62
	Závěr	67
	Použitá literatura	69
	Přílohy.....	72

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1- Stožár s mikrovlnnými spoji [2]	18
Obrázek 2- Schéma radioreléového spoje [3].....	18
Obrázek 3 – Troposférický rozptyl	19
Obrázek 4 - Součet vektorů útlumů	23
Obrázek 5- Oběh vody [6]	24
Obrázek 6- Tvary dešťových kapek s poloměry do 3 mm [5].....	27
Obrázek 7- Přibližný tvar kapky o průměru 7 mm	27
Obrázek 8 - Ukázka plošného spektra kapek ze dne 31.12.2017	29
Obrázek 9 - Ukázka objemového spektra kapek ze dne 31.12.2017	29
Obrázek 10- Elektromechanický distrometr [7]	30
Obrázek 11- Princip optického distrometru [7]	31
Obrázek 12 - 1D videodistrometr [7].....	31
Obrázek 13- Videodistrometr třetí generace [8]	32
Obrázek 14 - Specifikace vnější a vnitřní jednotky videodistrometru třetí generace [8]	33
Obrázek 15 – Schéma rozložení vnitřních komponent videodistrometru [8].....	34
Obrázek 16 - Reálný pohled na vnitřní rozložení videodistrometru.....	34
Obrázek 17 - Ocelové kuličky: náhražky skutečných kapek pro kalibraci.....	37
Obrázek 18 - Přepis názvu souboru dle dne, který chceme konvertovat	39
Obrázek 19 - Vlastní konvertování zvoleného souboru.....	39
Obrázek 20 - Výsledný soubor po konvertování	39
Obrázek 21 - Popis dat konvertovaného souboru	40
Obrázek 22 - Kinetická energie kapek_1	42
Obrázek 23 - Kinetická energie kapek_2.....	42
Obrázek 24 - Graf intenzity srážek – 1 den = 1440 minut.....	43

Obrázek 25 - Jednominutové plošné spektrum kapek	44
Obrázek 26 - Jednominutové plošné spektrum kapek – zlogaritmováno	44
Obrázek 27 - Jednominutové objemové spektrum kapek	45
Obrázek 28 - Jednominutové objemové spektrum-zlogaritmováno	46
Obrázek 29- 3D graf plošného spektra pro jeden den – zlogaritmováno	46
Obrázek 30 - 3D graf objemového spektra pro jeden den – zlogaritmováno	47
Obrázek 31 - Průměrování N_p pro jeden den	47
Obrázek 32 - N_p +- směrodatná odchylka	47
Obrázek 33 - Průměrné denní plošné spektrum.....	48
Obrázek 34 - Průměrné denní plošné spektrum-zlogaritmováno	48
Obrázek 35 - Průměrování $N(D)$	49
Obrázek 36 - $N(D)$ +- směrodatná odchylka	49
Obrázek 37 - Průměrné denní $N(D)$	49
Obrázek 38 - Průměrné denní $N(D)$ - zlogaritmováno	50
Obrázek 39 - Závislost vypočtené radarové odrazivosti na intenzitě srážek	51
Obrázek 40 - Závislost radarové odrazivosti na intenzitě srážek-regrese.....	51
Obrázek 41 – Závislost $M_{3,67}$ na intenzitě srážek.....	52
Obrázek 42 - Závislost kinetické energie a M_5	52
Obrázek 43 - Analytické aproximace pro jednominutové spektrum $N(D)$	55
Obrázek 44 - Aproximace denního průměrného spektra $N(D)$ ze dne 31.12.2017	56
Obrázek 45 - Aproximace denního průměrného spektra $N(D)$ ze dne 29.6.2017	56
Obrázek 46 - A-test pro jeden den	57
Obrázek 47 - W-test pro jeden den_1	58
Obrázek 48 - W-test pro jeden den_2	58
Obrázek 49 - Plošné spektrum pro různé typy deště	59
Obrázek 50 - Plošné spektrum z testovacích dat	59

Obrázek 51 – Průběh spočteného měrného útlumu ze dne 31.12.2017	63
Obrázek 52 - Intenzita srážek, vypočtená distrometrem, ze dne 3.10.2017	63
Obrázek 53 - Měrný útlum pro $f=18,95\text{GHz}$, vypočtený z dat distrometru, ze dne 3.10.2017	64
Obrázek 54 - Časový průběh útlumu a intenzity srážek družice Alphasat v pásmu 19GHz pro období 3.10.2017 a okolí	64
Obrázek 55 - Závislost měrného útlumu na intenzitě srážek_1	65
Obrázek 56 - Závislost měrného útlumu na intenzitě srážek_2	65
Obrázek 57 - Závislost měrného útlumu na intenzitě srážek_3	65
Obrázek 58 - Závislost měrného útlumu na radarové odrazivosti	66

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Koeficienty tvaru v závislosti na velikosti kapky [5].....	27
Tabulka 2 - Pádové rychlosti kapek v závislosti na jejich velikosti [5]	28
Tabulka 3 - Technické specifikace zařízení [8]	33
Tabulka 4 - Ukázka protokolu distrometru – informace o jedné kapce, o efektivním průměru D = 4,39 mm [4]	36
Tabulka 5 – Ukázka hodnot dopředné rozptylové funkce v závislosti na průměru kapky, zde pro $f = 18,95\text{GHz}$ [11]	62

SEZNAM ZKRATEK

DSD	Drop size distribution
LWC	Liquid water content
UFA	Ústav fyziky atmosféry
UPCE	Univerzita Pardubice
ČR	Česká republika
AV	Akademie věd
MS	Microsoft
CCD	Charge-Coupled Device
FEI	Fakulta elektrotechniky a informatiky

ÚVOD

Radiokomunikace neboli přenos zpráv pomocí elektromagnetických vln je v dnešní době jeden z nejvýznamnějších, ne-li nejvýznamnější způsob přenosu informace. Ať už jde o televizní vysílání, internet, GPS či radarovou komunikaci a další, pořád zde působí několik nepříznivých vlivů, které tento druh přenosu tlumí, či v některých případech přímo znemožňují. Jedním z těchto vlivů je nepochybně déšť, protože jak je známo, voda je částečně vodivé médium, které tlumí elektromagnetické vlny šířící se atmosférou. Proto se v této práci zabývám tímto atmosférickým jevem, který měřím a zkoumám jeho nepříznivé účinky na radiokomunikace. V jednotlivých kapitolách jsou nejdříve vysvětleny pojmy, které postupně vedou k objasnění teorie ohledně dešťových kapek, telekomunikací a v neposlední řadě zařízení – videodistrometru, na kterém jsem pracoval a které umí velice přesně měřit déšť, respektive dešťové kapky. V dalších kapitolách je poté vysvětlení dešťových spekter a nalezení vhodných aproximací těchto spekter. V neposlední řadě dochází k výpočtům některých relevantních veličin, jako jsou například intenzita srážek, kinetická energie dešťových kapek, momenty spektra, měrný útlum a další.

1 STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Měření distrometrem jsou důležitá pro výpočty intenzit srážek a kategorizaci srážek, sběru informací o dešti (nejenom tedy intenzity srážek, ale i informace o velikosti kapek, jejich pádové rychlosti atd. Měření nacházejí uplatnění v meteorologii, radarové meteorologii, výzkumu šíření vln v atmosféře, stavebnictví (např. Stavební fakulta ČVUT se v současnosti zabývá erozivitou půd vlivem dešťů), zemědělství, pojišťovnictví atd.

Problematicke spekter kapek je věnováno velké množství publikací. Klasická a velmi důležitá studie Marshalla-Palmera (1948) musí být zmíněna především. Téměř každý vědec používá jejich model spekter kapek pro průměrný déšť, přičemž intenzita srážek je parametrem tohoto modelu spektra. Nejdůležitější nedávné práce týkající se problému DSD jsou zaměřeny na následující témata: [15]

Carolin Richterová (1995) prohlásila, že funkce Gamma je vhodnou analytickou aproximací DSD. Studovala závislost výskytu dešťů, mediánu a průměru kapek a v neposlední řadě tvarový faktor (μ -parametr v aproximaci Gamma) na synoptických událostech. Bylo možné rozlišovat základní typy dešťů podle číselné hodnoty tvarového faktoru μ . Carolin Richterová také zjistila, že intenzita deště neovlivňuje tvar spekter, protože nebyl nalezen žádný vztah mezi intenzitou dešťové srážky a tvarovým faktorem μ . [16]

Albert Waldvogel (1974) diskutoval "intercept" parametr N_0 v exponenciální aproximaci DSD. Prof. Waldvogel zjistil, že náhlé změny spektra lze snadno rozpoznat podle "skoku" v časovém průběhu. Navrhl jednoduchý algoritmus pro rozlišení vrstevnaté a konvektivní srážky (W-metoda v této práci). [17]

Tokay A. a Short D. (1996) zaznamenali dramatickou změnu "intercept parametru" N_0 v aproximaci spektra typu "Gamma" vyskytující se během dešťových událostí. To může odpovídat přechodu od deště konvektivního původu k dešti pocházejícímu ze stratiformní části (pro nás bohužel vzdálených) tropických systémů. Autoři představili empirickou stratiformní-konvektivní klasifikační metodu založenou na scatterplotu " N_0 " a "intenzita dešťových srážek." Tato studie se týká tedy pouze tropických dešťů a nelze ji "naslepo" aplikovat v ČR. [13]

J. Joss a E. Gori (1978) definovali "integrální" tvarový faktor " μ " spektra kapek odlišný od tvarového faktoru " μ ", který je parametrem aproximace Gamma. Diskutovali roli vzorkovací frekvence založené na tvarovém faktoru, že přidání mnoha okamžitých distribucí z různých

podmínek vede k exponenciálnímu distribuci, jakou navrhli např. Marshall a Palmer (1948). [18], [15]

J. Joss a A. Waldvogel (1968) upřesnili model Marshal-Palmerova modelu spektra pro mrholení, nepřetržitý déšť, přeháňky a bouřky pro podmínky Švýcarska. Tento návrh není dokonalý, protože je založen na krátkodobém měření spekter kapek. [19]

O. Fišer a M. Hagen (1998) diskutovali vliv integračního času na výsledné spektrum kapek. Pro větší integrační dobu byla ukázána rostoucí shoda mezi experimentálním spektrem kapek a jeho exponenciálním modelem. Rovněž byly ilustrovány a diskutovány varianty parametrů definujících spectrum kapek (N_0 , μ a λ) podle intenzity dešťových srážek. Byly ukázány a diskutovány dvě metody pro stanovení parametrů analytických aproximací spekter kapek (lineární regrese, metoda momentů). [20]

O.Fišer, D.Řezáčová, P.Pešice, Z.Sokol a O.Školoud (1998) realizovali pokus odhadnout základní typ deště z existujících záznamů o intenzitě dešťových srážek a využití délky trvání dešťové srážky, úhrnu srážek, popř. průměrné hodnoty či směrodatné odchylky intenzit srážek.

Fišer O., (2002 b) diskutoval o úloze určité velikosti dešťové kapky na výsledné specifické útlumu deště v mikro a mm kmitočtových pásmech. [21]

Fišer, O., (2003) porovnával stávající metody pro identifikaci meteorologických dešťů pomocí českých dat DSD. Je zapotřebí hodně práce, protože existující kritéria byla věnována pouze tropickým oblastem a uvedená studie má úvodní význam. [22]

Fišer, O., (2004) odvodil analytickou aproximaci radarové odrazivosti a dešťové intenzity (Z-R) s využitím českého měření spekter kapek. [23]

Fišer, O., (2006) publikoval předběžnou studii ukazující variabilitu spekter kapek a její frekvenční závislost. [24]

Fišer, O., (2007) analyzoval momenty DSD pro odhad dvoustranných vztahů mezi “produkty” spekter kapek (intenzita srážek, měrný mikrovlnný útlum, faktor radarové odrazivosti). [25]

Jameson, A. R., A. B. Kostinski (2002) našli mocninný vztah mezi dešťovou intenzitou a faktorem radarové odrazivosti. Přihlédli k faktu, že déšť nejen není statisticky homogenní, ale jde o jev čistě náhodný. [26]

Řezáčová D., Kašpar M., Novák P., Setvák M., (2007) zveřejnili přehled publikovaných a naměřených spekter dešťových kapek (Best, Marshall-Palmer a další distribuce). [27]

Pruppacher, H.R. a Klett, J.D., 1978 popsali také DSD oblačnosti zaměřené na rozdíly mezi spektrem oblačnosti a mlhy. [28]

Obecně řečeno, měření spekter kapek je poměrně vzácné. Největším problémem jsou finanční náklady na distrometr. Nejrozvinutější a uživatelsky přívětivé zařízení pro měření spekter kapek je videodistrometr (známé jsou videodistrometry vyvinuté na Gražské technické univerzitě a v “Joaneum Research” v Rakousku pod kontraktem s ESA). Jiný elektromechanický distrometr typu Joss-Waldvogel je používán v ETH Zurich. V Bavorsku (v DLR) používají optický distrometr. Několik distrometrů používá i BOKU (Universitaet fuer Bodenkultur, Vídeň) a Stavební fakulta ČVUT.

2 RADIOKOMUNIKACE

2.1 Význam radiokomunikací

Důsledkem civilizačního pokroku jsou bezpochyby i telekomunikace. Ať už jde o televizní, rádiové vysílání, přenos dat, povelů a informací, vše spojuje jediné, a to přenos pomocí elektromagnetické vlny šířící se prostorem, respektive atmosférou. Vzhledem ke stále se zvyšujícím nárokům na kvalitu přenosu či hardwarové součásti (antény, vysílače, přijímače apod.), je nutné tento elektrotechnický obor nadále zlepšovat a zpřesňovat. [1]

Významným telekomunikačním prostředkem jsou zejména radiokomunikace. Prostředky radiokomunikací obsazují vzhledem ke zvyšujícím se nárokům čím dál více frekvenčních pásem, které jsou v dnešní době považovány za jedno z našich přírodních bohatství. Tyto vzrůstající nároky mají vliv na využívání čím dál vyšších kmitočtů pro přenos, to ovšem obnáší požadavky na zvládnutí příslušné technologie, zaručující bezproblémový chod a spolehlivost daného přenosu (spoje) a zvládnutí „predikce“ chování, respektive vlastností elektromagnetické vlny v daném prostředí. [12]

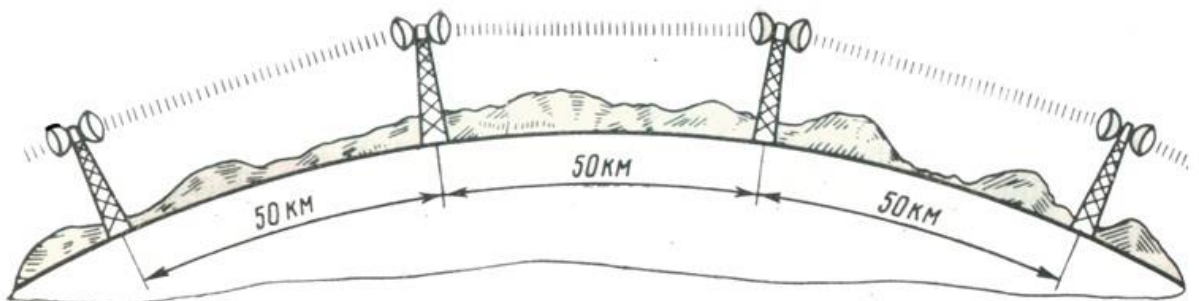
2.2 Směrové spoje

2.2.1 Radioreléový spoj



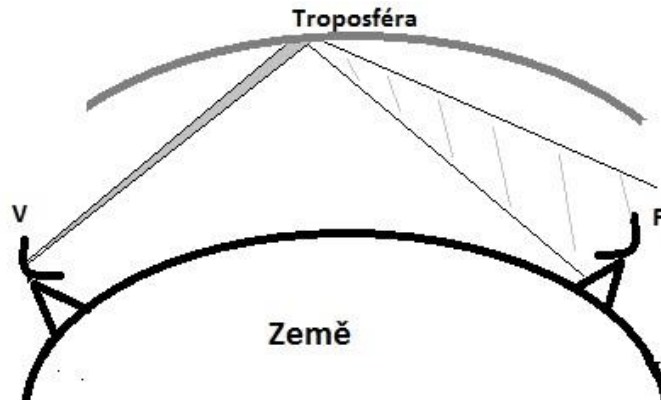
Obrázek 1- Stožár s mikrovlnnými spoji [2]

Radioreléové neboli mikrovlnné spoje slouží pro přenos televizního a rádiového vysílání, dále pro přenos hovorů a dat. Systémy point – to – point jsou spoje na přímou viditelnost s úzce směrovými anténami. Přenos tohoto spoje je omezen vzdáleností, jelikož je nutná přímá viditelnost, proto se pro dosažení vyšších vzdáleností používají retranslační stanice, které mají za úkol přijmout signál od vysílače, či předchozí retranslační stanice, zesílit ho a poslat na další stanici, či k přijímači. Tyto stanice se logicky umísťují na vyvýšené body kvůli zajištění již zmíněné přímé viditelnosti. Regionální a přístupové sítě využívají frekvenční pásma např.: 13, 15, 18, 23 a 38 GHz. Spoje na velké vzdálenosti od cca 40 km využívají pásma mezi 3,6 – 10,86 GHz. [2]



Obrázek 2- Schéma radioreléového spoje [3]

Jak bylo již řečeno, při využití radioreléových spojů pro přenos signálu je nutná přímá viditelnost mezi vysílačem a přijímačem. V některých případech lze pro přenos na velké vzdálenosti využívat atmosférického jevu, zvaného troposférický rozptyl. V tomto jevu dochází k odrazu vyslaného úzce směřovaného paprsku od horních vrstev troposféry, která se nachází ve vzdálenosti cca 16 km nad zemským povrchem. Nevýhodou tohoto spoje je však nutnost vyslání signálu o velkém výkonu (v desítkách kW), přičemž přijatý signál je velmi slabý (cca 1nW). [2]



Obrázek 3 – Troposférický rozptyl

2.2.2 Družicový spoj

Pro družicové spoje (satellite links) se používají zejména geostacionární družice, které obíhají Zemi ve výšce 36000 km nad jejím povrchem. Tato výška je zvolená záměrně, jelikož doba, za kterou oběhnou Zeměkouli je stejná, jako doba, za kterou se Země otočí okolo své osy. Ve výsledku to znamená, že je družice vždy nad stejným bodem zemského povrchu, většinou nad rovníkem. [2]

Družice se dělí na pasivní – pouze odráží přijatý signál a na aktivní vybavené několika transpondéry, které představují na sobě nezávislé retranslační stanice. Výhodou aktivních družic je schopnost přijmout vyslaný signál ze Země (up-link signal), převést ho do jiného frekvenčního pásma, zesílit ho a vyslat zpět směrem k Zemi (down-link signal). Pásma, ve kterých pracují družicové spoje jsou relativně pestrá, za zmínku stojí pásmo C (C-band), ve kterém se up-link signal vysílá na frekvenci 6 GHz a následně down-link signal od družice na frekvenci 4 GHz. Pro toto kmitočtové pásmo jsou zapotřebí velké parabolické antény. Další z pásem je pásmo KU (KU-band), které pracuje na vyšších frekvencích (12-14 GHz) a pro přenos jsou potřeba antény výrazně nižších rozměrů (cca 60-100 cm), nežli tomu je u C-band.

Družicové spoje lze využít k realizaci dvoubodových spojení, ovšem mnohem praktičtější je využití družic k tzv. broadcast přenosům – signál vyslaný od jednoho zdroje lze doručit více příjemcům. Dobrým příkladem broadcastu je např. satelitní televize. Další praktickým využitím družic je tzv. multiple access, neboli vícenásobný přístup. Vícenásobný přístup je opak broadcastu – signál od více zdrojů lze doručit pouze jedinému příjemci. [2]

2.3 Atmosférický útlum

Atmosférický útlum je jedním z nejdůležitějších vlivů na elektromagnetickou vlnu šířící se prostorem, které se musí brát v potaz při návrhu a realizaci radioreléového či družicového spoje. [4] Dělí se na:

2.3.1 Přímý atmosférický útlum:

- Hydrometeory (déšť, sníh, kroupy, ledové krystalky, aerosoly)
- Malé hydrometeory (oblaka a mlhy)
- Atmosférické plyny (vodní pára a kyslík)
- Tající vrstva (vliv pouze na družicové spoje)

2.3.2 Nepřímý atmosférický útlum:

- Mnohacestné šíření (interferenční úniky)
- Útlum terénní překážkou (kombinovaný s profilem terénu)

Přímý atmosférický útlum má malý vliv na kmitočty do 10GHz. Projevuje se zde někdy útlum nepřímý, způsobený terénní překážkou. Dále na všech kmitočtech nepříznivě působí mnohacestné šíření, tzv. multipath, které způsobuje interferenční úniky. Na přijímací anténě se sčítají všechny možné odrazy vyslané vlny, každý přichází v jiný čas a s jinou fází. Vlivem tohoto dochází po celkovému sečtení všech příchozích odrazů k časové fluktuaci amplitudy přijatého signálu. Na vyšších elevacích, u družicových spojů se interferenční úniky tolik neprojevují. [4]

U kmitočtů 11 a 12 GHz se v přímém atmosférickém útlumu můžeme omezit pouze na útlum způsobený deštěm. Ovšem na vyšších frekvencích se už projevují i jiné hydrometeory, jako sníh, kroupy, ledové krystalky, aerosoly, ale také oblaka, mlhy, vodní pára, kyslík.

V neposlední řadě musíme ve vyšších frekvenčních pásmech počítat také s vlivem tající vrstvy. V našem podnebí se ale soustředíme hlavně na útlum způsobený deštěm, jelikož je oproti dalším vlivům dominantní. [4]

2.4 Útlum hydrometeory

Abychom mohli popsat elektromagnetickou vlnu šířící se skrz prostor vyplněný hydrometeory, je nutné definovat, respektive znát tyto podmínky: [4]

- Velikost, tvar a počet hydrometeorů v jednotce objemu
- Geometrickou orientaci padajících hydrometeorů vzhledem k šířící se elmag. vlně (směru jejího šíření)
- Popis vzájemného působení (interakce) mezi vlnou a hydrometeory
- Délku spoje v oblasti vyplněné hydrometeory

Hydrometeory se chovají vůči vlně jako ztrátové dielektrikum, které část energie vlny pohltí a přemění na jalové teplo a část energie vyzařují rozptýleně do nežádoucích směrů, díky indukovaným proudům, které se v nich vytvoří díky elmag. indukci. Vztah mezi vlnou, která na hydrometeory dopadá a vlnou, která z nich dále odchází popisuje tzv. rozptylová funkce. Abychom byli schopni tuto funkci vypočítat, je nutné znát komplexní index lomu hydrometeoru, který však závisí na teplotě, která se samozřejmě mění. Ovšem pro výpočty se obvykle volí za parametr teplota 20 °C, což je hodnota průměrné letní teploty. [4]

Pro přesnější výpočty atmosférického útlumu a depolarizace, způsobenými hydrometeory, se na drahách směrových(družicových) spojů počítá s výškovým profilem parametrů pro výpočet. Mezi tyto parametry patří výše zmíněná teplota, dále změna tvaru (deformace) hydrometeoru v závislosti na odpařování během „pádu“, respektive dopadu na povrch, nebo například změna sklonu jeho dráhy způsobená větrem. Dále mění se pádová rychlost, výšková změna počtu hydrometeorů v jednotce objemu. Tyto parametry jsou všechny závislé na výšce, ve které se hydrometeory zrovna nachází a na tlaku okolní atmosféry. [4]

V našem podnebí převládá útlum deštěm, útlum v oblacích a vodní páře dosahuje maxima 1-2 dB, ale trvá déle než při dešti, proto se lze omezit na kmitočtech do 20GHz, na útlumový mechanismus. Proto jsou útlumové predikce nejvíce počítány právě pro dešť. Navíc jsou zde již změřené údaje o dešti – distribuce intenzit dešťů z hydrometeorologických měření provedených v minulosti, které se pro výpočty statistických vlastností predikce útlumu

způsobeného deštěm používají. Co se týče suchého sněhu a ledových krystalků, ty způsobují jen malé ztráty útlumem v pásmech mikrovlnných spojů, jelikož mají malý index lomu. Na druhou stranu nesmíme zanedbávat vliv ledových krystalků a mokrého sněhu na depolarizaci vlny. [4]

2.5 Útlum vodní párou a oblaky

Útlum vodní párou a oblaky má vliv na vyšších frekvencích družicových spojů. Zejména se pak projevuje na nižších elevacích. Jelikož jsou oblaka tvořeny malými kapičkami vody, hrají důležitou roli při výpočtu celkového útlumu. Tedy nesmíme zahrnovat pouze útlum způsobený hydrometeory, ale musíme počítat i s útlumem, který způsobují oblaka plné vody, nebo vodní páry. Jak již bylo řečeno, oblaka jsou plné vodních kapiček. Faktor, udávající objem, respektive obsah kapalné vody v oblaku se nazývá liquid water content – LWC a udává se v jednotkách g/m^3 . [4]

Vodní pára je z hlediska meteorologie brána jako atmosférický plyn a má také vliv na degradaci elmag. vlny procházející atmosférou. Při určování vodní páry je nutno znát hustotu vody v atmosféře. Útlum vodní párou má rezonanční charakter a jeho první rezonanční maximum se vyskytuje na frekvenci 22,4 GHz. Dále se s rostoucím kmitočtem začínají projevovat i jiné plyny obsažené v atmosféře, jako příklad lze uvést kyslík, který má své první rezonanční maximum na frekvenci okolo 64 GHz. [4]

Dalším z tlumících vlivů je tající vrstva (zóna tání), což je několik set metrů tlustá vrstva v atmosféře, vyskytující se pod nulovou izotermou. Tato zóna obsahuje směs vody, ledových krystalek a sněhu a výrazně tlumí mikrovlnný signál mezi družicí a zemí. [4]

Mimo útlum hydrometeory se v atmosféře vyskytuje ještě útlum velmi krátkého trvání, tzv. scintilace. Tyto scintilace se dělí na:

- Vyskytující se při čisté obloze (útlum je zde způsoben nehomogenním indexem lomu v atmosféře)
- Vyskytující se při dešti (útlum je způsoben vícenásobným rozptylem na dešťových kapkách)

Tedy celkový útlum A_t je tedy spojený nejen s útlumem hydrometeory, ale i s útlumem způsobeným scintilacemi.

Vztah mezi těmito útlumy je dán rovnicí:

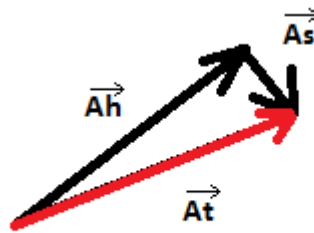
$$A_t^2 = A_h^2 + A_s^2 \quad [\text{dB/km}], \quad (1.1)$$

kde: A_t je celkový útlum [dB/km],

A_h je útlum hydrometeory [dB/km],

A_s je útlum scintilacemi [dB/km].

Jak lze vidět, jedná se o Pythagorovu větu, jelikož vektory celkového útlumu, útlumu hydrometeory a útlumu scintilacemi společně tvoří pravouhlý trojúhelník, ilustrace níže: [4]



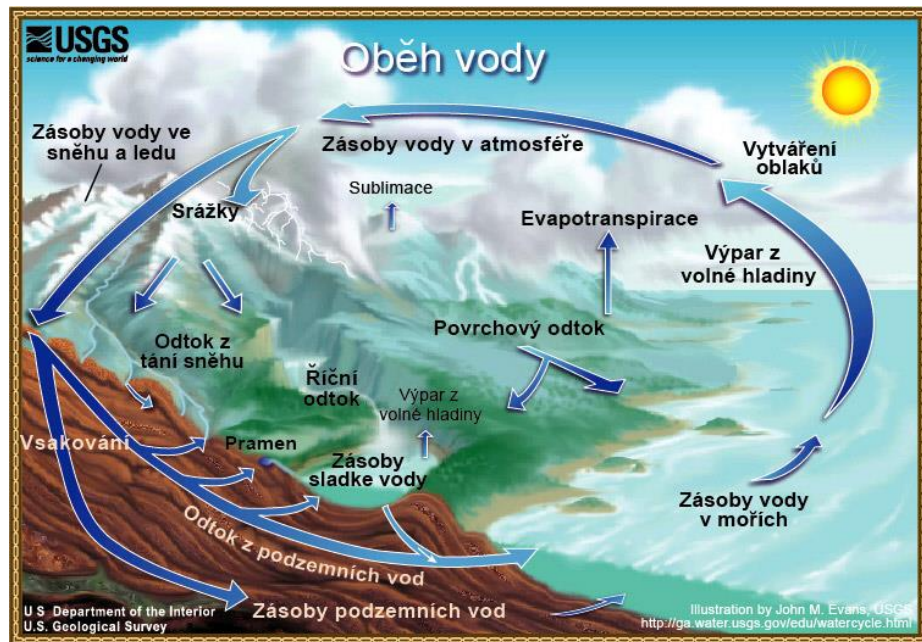
Obrázek 4 - Součet vektorů útlumů

3 DĚŠŤ

3.1 Popis deště

Děšť zaujímá hlavní místo v celém hydrometeorologickém cyklu naší planety. Vlhkost, která je vypařená z moří a oceánů kondenzuje a vznikají oblaka neboli mraky. Z nich poté padají srážky, nazývané dešť. Celý hydrometeorologický cyklus následně uzavírají řeky, které svedou vodu zpět do moří a oceánů. [12]

Jednoduché dešťové prostředí je část troposféry nad zemským povrchem, které je vyplněno suchým vzduchem. Konstanta šíření této části troposféry bez uvažování dešťových kapek (tedy je brán pouze suchý vzduch) je dána vztahem: $\hat{\nu} = \frac{2\pi}{\lambda}$, kde λ je vlnová délka. [12]



Obrázek 5- Oběh vody [6]

Jednoduché dešťové prostředí je ale samozřejmě tvořeno i dešťovými kapkami, které dosahují různých tvarů a velikostí. Kapky padají volným pádem směrem k zemskému povrchu a jsou ovlivňovány větrem, který deformuje jejich tvar a naklání jejich trajektorie (dráhy) letu. Dešťové kapky jsou popsány dešťovým spektrem, které je vysvětleno v jedné z dalších kapitol této práce. Homogenní jednoduché dešťové prostředí je taková část dešťového prostředí, ve které je v každém elementu prostoru stejné spektrum kapek. [12]

3.2 Typologie dešťů

Z hlediska zpřesnění výpočtů radarové odrazivosti, měrného útlumu a dalších veličin je nutné definovat alespoň základní typy dešťových srážek. Mezi tyto typy patří dešť vrstevnatý neboli stratiformní a dešť kumulativní neboli konvektivní. Pro určení typu deště z měřených dat slouží vybrané výpočetní metody. [4]

3.3 Vybrané testovací metody pro určení typu deště

Pro určení typu dešťových srážek z měřených dat slouží hned několik metod. Pro tuto diplomovou práci jsem použil dvě vybrané – Metodu A (Tokay-Shortovu) a metodu W (Waldvogel). [4]

3.3.1 Metoda A – Tokay-Shortova

V této výpočetní metodě pro zjištění typu deště hraje hlavní roli definovaný parametr CS(Cumuliform-Stratiform), který je dán vztahem: [4], [13]

$$CS = \frac{N_0}{(4 \cdot 10^9) \cdot R_d^{-4,3}} \quad [-], \quad (3.1)$$

kde: N_0 je parametr Gamma aproximace spektra dešťových kapek [$m^{-3} \cdot m^{-4} \cdot mm^{-1}$],
 R_d je intenzita srážek [mm/h].

Intenzita srážek se vypočítá ze spektra dešťových kapek, dle vztahu: [4], [13]

$$R_d = \frac{3,6}{10^3} \cdot \pi \cdot \int_0^\infty D^3 \cdot v(D) \cdot N(D) \cdot dD \quad [mm/h], \quad (3.2)$$

kde: D je efektivní průměr dešťové kapky (střed třídy) [mm],
 $v(D)$ je vypočtená pádová rychlost kapky [$m \cdot s^{-1}$],
 $N(D)$ je spektrum dešťových kapek [$mm^{-1} \cdot m^{-3}$].

Vyhodnocení výsledku výpočtu vztahené k tropickému podnebí: [4], [13]

- $CS < 1$, jde o stratiformní typ dešťových srážek
- $CS > 1$, jde o konvektivní typ dešťových srážek

3.3.2 Momentová metoda W

V této metodě určení typu dešťových srážek figuruje parametr W, daný vztahem: [4]

$$W = \frac{R_z}{R_d} \quad [-], \quad (3.3)$$

kde: R_z je intenzita srážek vypočtená na základě faktoru radarové odrazivosti [mm/h],
 R_d je intenzita srážek vypočtená viz rovnice (2.2) [mm/h].

Pro výpočet faktoru radarové odrazivosti se používá obecně vztah: [4]

$$z = 300 \cdot R_z^{1,5} \quad [m^3 \cdot mm^{-1}], \quad (3.4)$$

kde: R_z je intenzita srážek vypočtená na základě faktoru radarové odrazivosti [mm/h].

Ovšem přesnější interpretace výpočtu faktoru radarové odrazivosti je založena na spektru dešťových kapek: [4]

$$z = \int D^6 \cdot N(D) \cdot dD \quad [\text{m}^3 \cdot \text{mm}^{-1}], \quad (3.5)$$

kde: D je efektivní průměr dešťové kapky [mm],

$N(D)$ je spektrum dešťových kapek [$\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$].

Z rovnice (2.3.2-2) potom můžeme vyjádřit vztah pro výpočet intenzity srážek R_z : [4]

$$R_z = \left(\frac{z}{300}\right)^{(1/1,5)} = \left(\frac{z}{300}\right)^{\frac{2}{3}} \quad [\text{mm/h}], \quad (3.6)$$

kde: z je faktor radarové odrazivosti [?].

Vyhodnocení výsledku výpočtu vztahené k našemu podnebí: [4]

- $W < 1$, jde o stratiformní typ deště
- $W > 1$, jde o konvektivní typ deště

3.4 Popis dešťové kapky

V různých pohádkách a kresbách se člověk setkává s takovým tvarem kapky, který prakticky neexistuje, respektive jen na zlomek sekundy. Je to tvar, kdy má kapka na horní straně špičku, toto je ovšem jen za situace, kdy kapka odpadáva, například z vodovodního kohoutku a v tomto tvaru setrvává pouze zlomek sekundy. Skutečný tvar velmi malé kapky je kulový, přičemž s rostoucí velikostí dešťové kapky roste i její deformace (fazolovitý tvar). Čím větší kapka, tím více je tvar koule odspodu plošší a v některých případech velkých kapek je spodní „ploška“ dokonce prohnutá dovnitř. Obecně mají dešťové kapky velikost od 0,1 až po 7 mm. Větší kapky jsou už nestabilní a tříští se na menší. Ovšem existují i výjimky, v roce 2004 byly nad Brazílií a Marshallovými ostrovy zaznamenány kapky o velikosti až 10 mm. [5]

Co se týče tvaru kapky, který byl popsán v odstavci výše, jde o výsledek rovnováhy dvou protichůdných sil. Kulatý tvar kapky vzniká tak, že se její povrchové napětí snaží minimalizovat kontaktní plochy mezi vzduchem a kapkou. Na druhou stranu se aerodynamický tlak snaží o horizontální roztažení dešťové kapky a dává jí tak tvar zploštělého elipsoidu. [5]

Model zakřivení pravidelné koule nám udává tato rovnice: [5]

$$r(\theta) = a(1 + \sum_{N=0}^{10} C_n \cos(n\theta)) \quad [-], \quad (3.7)$$

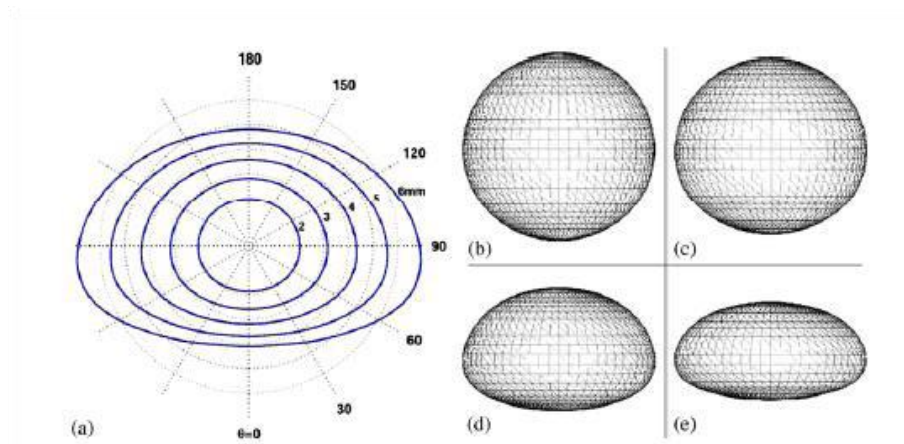
kde: α je poloměr nezakřivené koule, která je umístěna ve středu hmoty kapky [mm],

Θ je úhel, udávající elevaci, když je $\Theta=0$, kapka směřuje kolmo dolů [°],

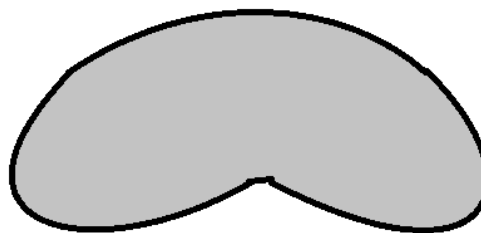
C_n je koeficient tvaru [-].

Tabulka 1 - Koeficienty tvaru v závislosti na velikosti kapky [5]

a (mm)	Shape co-efficients ($c_n \times 10^4$) for $n =$										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.5	-28	-30	-83	-22	-3	2	1	0	0	0	0
1.0	-134	-118	-385	-100	-5	17	6	-1	-3	-1	1
3.0	-843	-472	-2040	-240	299	168	-21	-73	-20	25	24
4.5	-1328	-403	-2889	-106	662	153	-146	-111	18	81	31



Obrázek 6- Tvary dešťových kapek s poloměry do 3 mm [5]



Obrázek 7- Přibližný tvar kapky o průměru 7 mm

Určování tvaru dešťových kapek je důležité pro jednoznačné určení rozptylu nebo například pro výpočet depolarizace. [5]

Pádová rychlost kapek je úměrná přibližně $D^{0,67}$ (0,67- té mocnině průměru kapky). Ovšem padající dešťové kapky mají oproti šířící se elektromagnetické vlně, která se šíří rychlostí světla, rychlost zanedbatelnou, tzn. pro signál se jeví, jako nehybné objekty. [5]

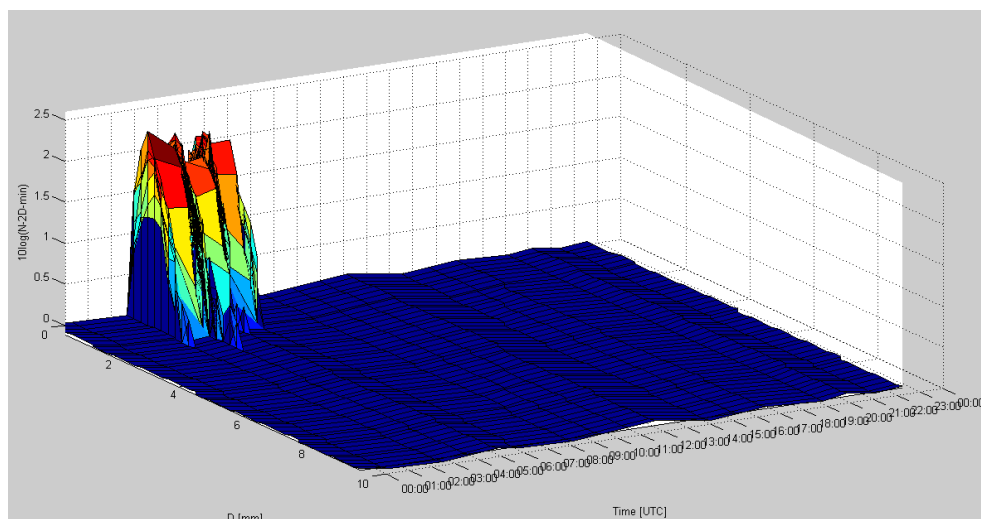
Tabulka 2 - Pádové rychlosti kapek v závislosti na jejich velikosti [5]

Spherical drops		Ellipsoidal drops			
Radius (mm)	Speed (m/s)	Radius (mm)	Speed (m/s)	Radius (mm)	Speed (m/s)
0.1	0.72	0.5	4.0	2.5	9.2
0.15	1.17	0.75	5.43	2.75	9.23
0.2	1.62	1.0	6.59	3.0	9.23
0.25	2.06	1.25	7.46	3.25	9.23
0.3	2.47	1.5	8.1	3.5	9.23
0.35	2.87	1.75	8.58	3.75	9.23
0.4	3.27	2.0	8.91	4.0	9.23
0.45	3.67	2.25	9.11		

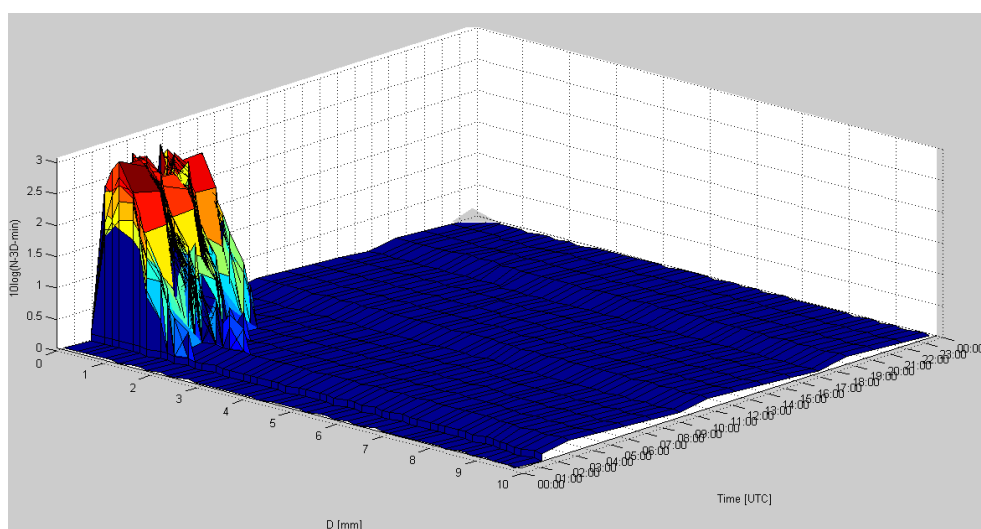
3.5 Spektrum dešťových kapek

Jak se lze dočíst výše, velikost kapek se nevyjadřuje v jejich reálných průměrech, ale v tzv. efektivních průměrech D , které představují průměry hypotetických kulových kapek, mající stejný objem, jako kapky reálné. Spektrum dešťových kapek N (anglicky DSD – drop size distribution) lze chápat, jako hustotu pravděpodobnosti velikosti kapek, vyskytujících se v jednotce objemu. To znamená, že se v praxi definuje součin $N(D) \cdot dD$, jako počet kapek o efektivním průměru v intervalu D až $D + dD$ v jednotce objemu. Pro spektrum dešťových kapek se využívá jednotek (rozměrů) $[m^{-3} mm^{-1}]$, nebo $[cm^{-4}]$. [4]

Důležitým faktem je skutečnost, že se v mikrovlnných aplikacích při výpočtu parametrů (útlum rádiového signálu hydrometeory, radarová odrazivost atd.) používají technické aproximace, které jsou často nepřesně založeny pouze na intenzitě dešťů, a ne na znalosti celého spektra DSD. Je nutné vědět, že tyto parametry nabývají různých hodnot pro různé typy dešťů. To znamená, že se při stejné intenzitě dešťových srážek mohou lišit, jelikož v přírodě neexistuje pouze jeden typ deště. Vzorce, podle kterých jsou tyto parametry počítány je pak nutno modifikovat alespoň pro základní typy dešťů, které jsou uvedeny v kapitole 3. [4]



Obrázek 8 - Ukázka plošného spektra kapek ze dne 31.12.2017



Obrázek 9 - Ukázka objemového spektra kapek ze dne 31.12.2017

4 DISTROMETR

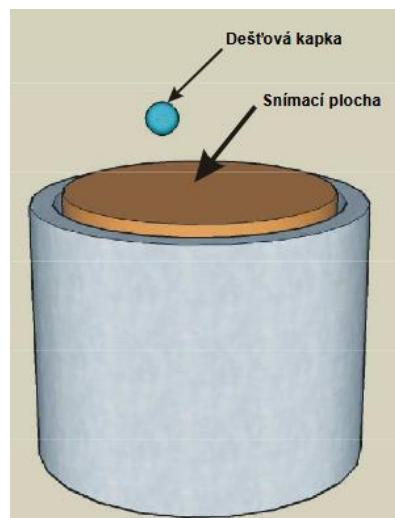
Distrometr je zařízení, které měří déšť, respektive vlastnosti dešťových kapek ve srážkách. Nejdůležitějším parametrem, který videodistrometr měří je efektivní průměr dešťové kapky, což je průměr hypotetické kulové kapky, jejíž objem je totožný s objemem vody obsaženým v kapce reálné. [4]

Než bude podrobněji přiblížen videodistrometr, který je použit pro tuto diplomovou práci, je nutno podotknout, že v praxi se používají/používali tři druhy distrometrů pro měření deště: [7]

- Elektromechanický distrometr
- Optický distrometr
- Videodistrometr

4.1 Elektromechanický distrometr

Elektromechanický distrometr funguje na principu snímací plochy. Dešťová kapka dopadá na piezoelektrický snímač (plochu) a na základě síly, proporcionálně převedené na napětí, kterou kapka dopadne je následně počítačovou jednotkou vypočtena velikost kapky a objem kapky. Nevýhodou tohoto typu distrometru je zajištění dobrého odvádění vody ze zařízení, což bývá problém a následně dochází k chybným měřením. Další nevýhodou je neschopnost určení tvaru kapky. [7]

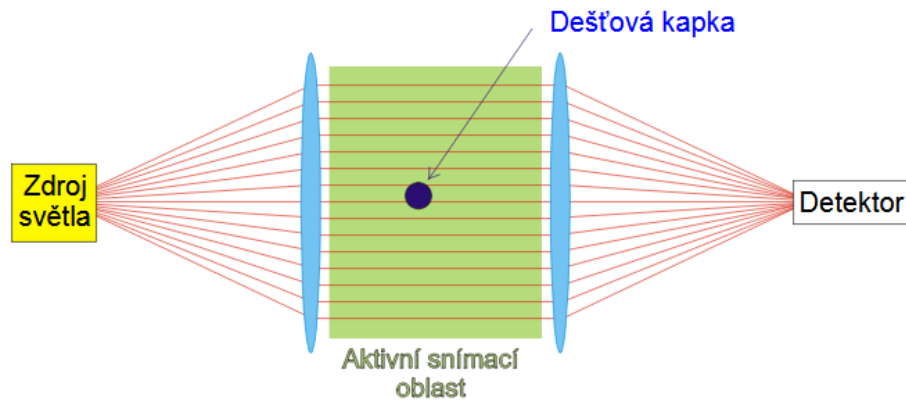


Obrázek 10- Elektromechanický distrometr [7]

4.2 Optický distrometr

Již z názvu tohoto zařízení je patrné, že pracuje na základě optiky. Jednoduchá soustava zdroje, snímané oblasti a detektoru světla zajišťuje měření padajících dešťových kapek. Princip spočívá v tom, že vyzařovaný optický svazek má tvar čáry, respektive rovnoběžných paprsků, které jsou vytvořeny pomocí optické soustavy (kombinace laseru a otáčejících se zrcátek). Tento svazek rovnoběžných paprsků putuje přes aktivní snímací oblast až k optickému detektoru. Výstupem

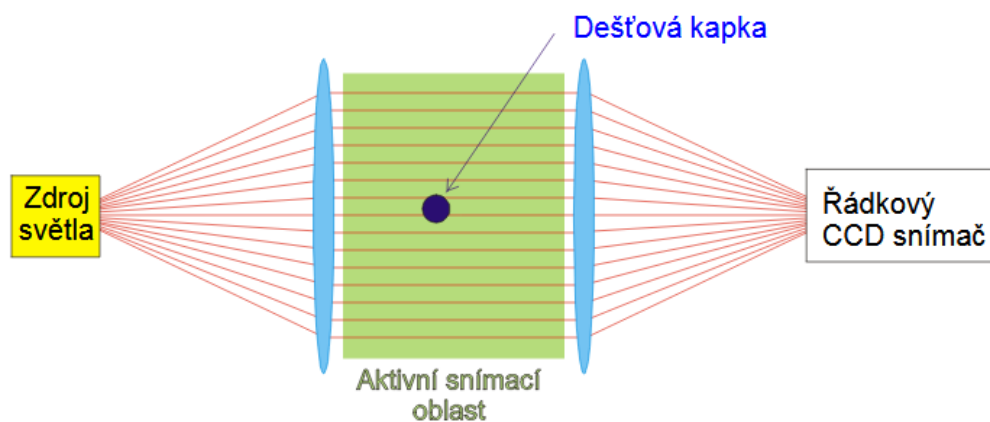
tohoto zařízení je signál, který odpovídá intenzitě zdroje světla a pokud se v aktivní (snímané) oblasti objeví kapka, tento signál se oproti zdroji utlumí a útlum se následně vypočte. Na základě velikosti útlumu lze poté vypočítat velikost a objem dešťové kapky. Výhoda optického distrometru je v tom, že se nemusí řešit odtok vody a další mechanické problémy, ale zároveň není schopen určit tvar kapky, stejně, jako elektromechanický distrometr. [7]



Obrázek 11- Princip optického distrometru [7]

4.3 1D Videodistrometr

Tento „základní“ videodistrometr funguje obdobně, jako optický distrometr. Jediná a zásadní změna je v oblasti optického detektoru. Jednoduchá fotodioda, či fototranzistor je zde nahrazen vysokorychlostním CCD snímačem, který je schopen snímat objekty procházející měřenou oblastí tak rychle, že je následně možné rekonstruovat jejich obraz. Tato skutečnost umožňuje výpočet některých důležitých parametrů dešťových kapek, jako např. pádovou rychlost, či sklon dešťové kapky v okamžiku průletu snímanou oblastí. [7]



Obrázek 12 - 1D videodistrometr [7]

4.4 2D Videodistrometr

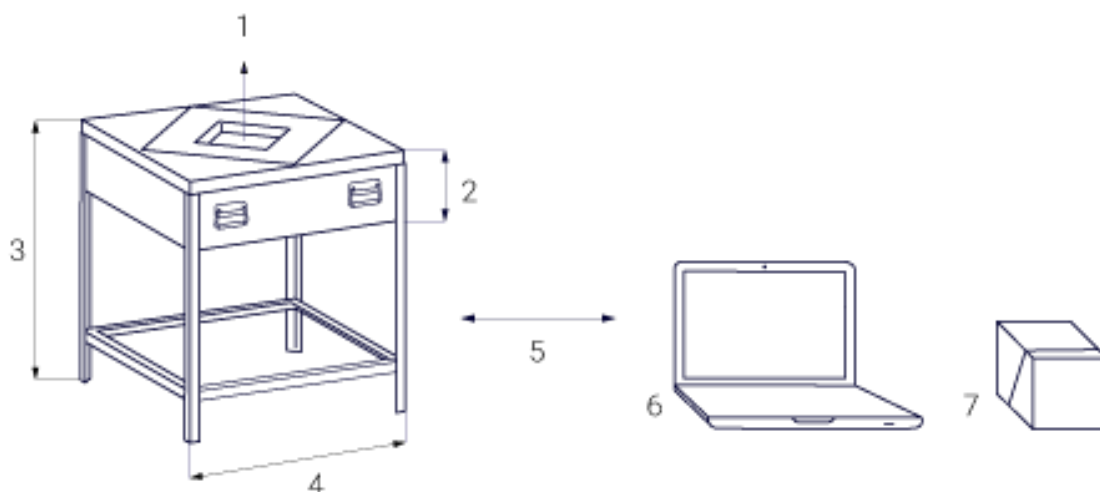
V současnosti nejlepším distrometrem je 2D videodistrometr třetí generace, na kterém je tato diplomová práce založena. Toto zařízení bylo zakoupeno UFA AV ČR – Ústavem Fyziky Atmosféry České Republiky, sídlícím v Praze. Tento model získává velice přesná data a je založen na kombinaci 2 videodistrometrů otočených navzájem o 90°. [4], [7]



Obrázek 13- Videodistrometr třetí generace [8]

4.5 Popis zařízení

Videodistrometr vypadá na první pohled jako stůl, ve kterém je uprostřed vyříznut vodorovný otvor o rozměrech 10 x 10 cm, kterým prolétávají měřené dešťové kapky. Prostor okolo otvoru je pokryt „tlumící“ sítí, která má za úkol zachytávat ostatní kapky tak, aby nedocházelo k jejich roztržení a následně propadu měřicím prostorem, protože jinak by docházelo k milným měřením velmi malých kapek, které se v reálném měřeném dešti nenachází. [4]



OUTDOOR UNIT

- 1** Measuring Area: 100 x 100 mm
- 2** Height: approx. 220 mm
- 3** Height: approx. 890 mm
- 4** Width: approx. 960 mm

INDOOR UNIT

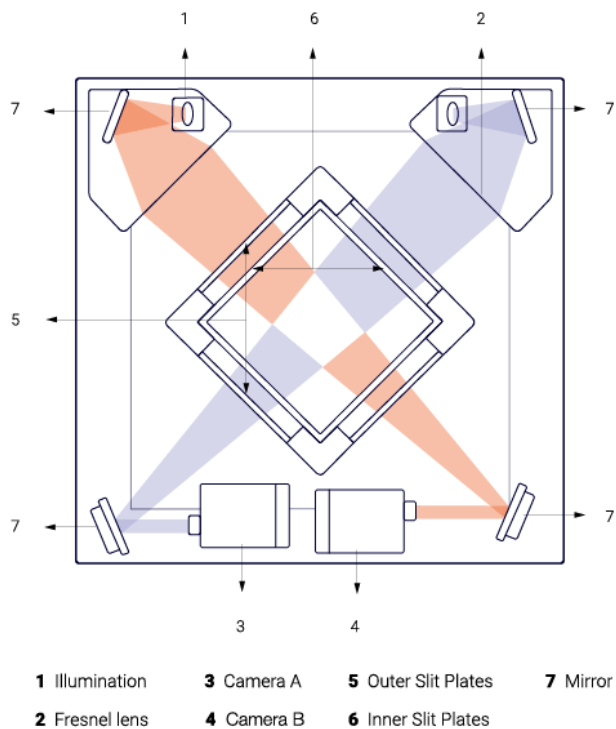
- 5** Max. Distance: 100 m
- 6** Windows Notebook PC
- 7** Power Supply Unit 600 W and Cable

Obrázek 14 - Specifikace vnější a vnitřní jednotky videodistrometru třetí generace [8]

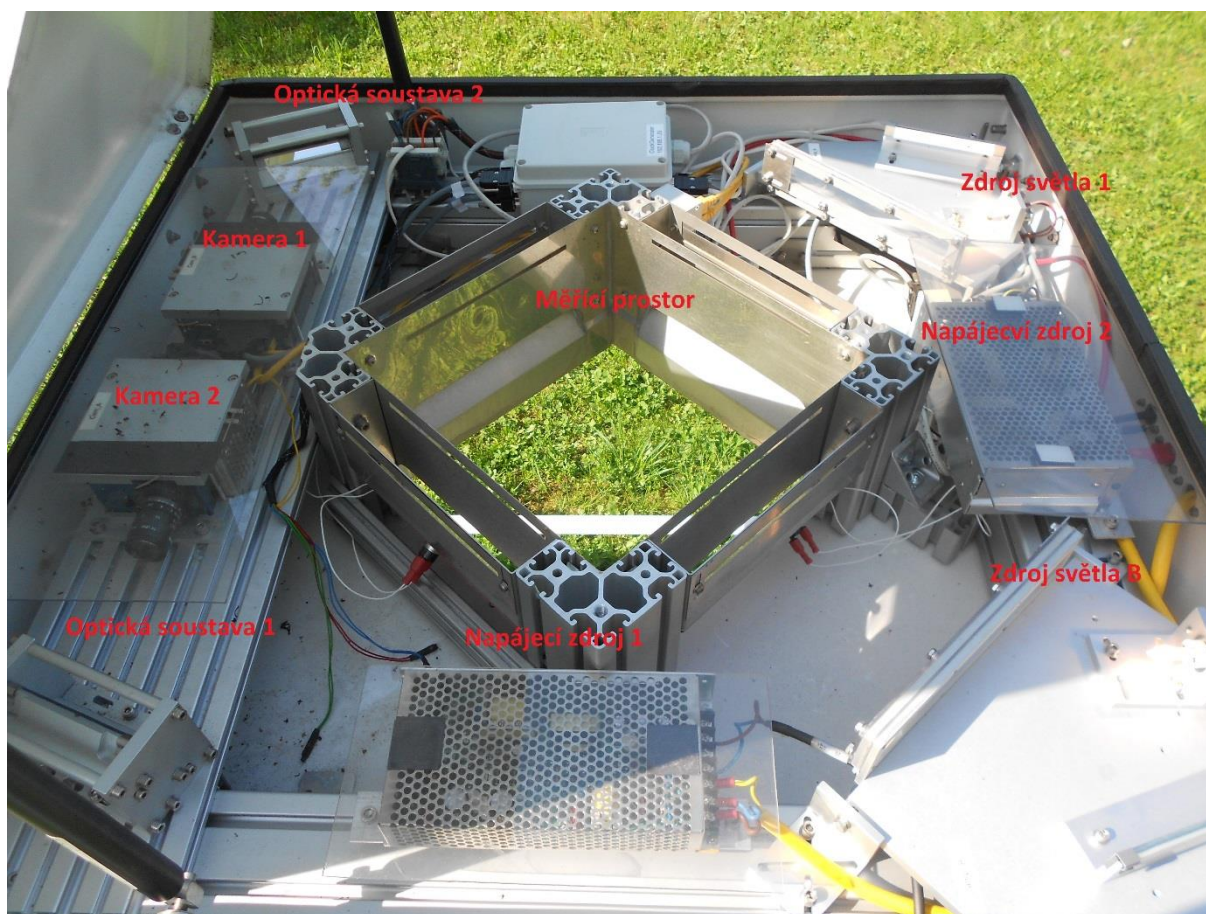
Uvnitř zařízení se nacházejí: optická soustava, 2 vysokorychlostní kamery, 2 zdroje světla a vyhodnocovací jednotka. Měřené kapky se ve venkovní jednotce snímají, vyhodnotí a odešlou do počítačové (vnitřní) jednotky, umístěné v interiéru UFA AV ČR. [4]

Tabulka 3 - Technické specifikace zařízení [8]

Horizontální rozlišení	Lepší, než 0,17 mm, pro pádovou rychlost < 10 m/s
Vertikální rozlišení	Lepší, než 0,17 mm, pro pádovou rychlost < 10 m/s
Přesnost určení pádové rychlosti	Lepší, než 4 %, pro pádovou rychlost < 10 m/s
Integrační čas (pro zobrazení)	15 s až 12 hod
Napájení	100 – 240 V (50/60 Hz)
Spotřeba	300 W
Provozní teplota	0 – 35 °C
Hmotnost	80 kg



Obrázek 15 – Schéma rozložení vnitřních komponent videodistrometru [8]



Obrázek 16 - Reálný pohled na vnitřní rozložení videodistrometru

4.6 Data z videodistrometru

Prolétávající kapky deště jsou snímány horizontálně pomocí dvou kamer. Měření distrometru udává tyto informace: [4]

- Čas průletu dešťové kapky s přesností na tisícinny vteřiny
- Efektivní průměr dešťové kapky
- Pádovou rychlost kapky
- Zploštělost kapky (poměr horizontální a vertikální poloosy)
- Úhel sklonu kapky v okamžiku průletu měřenou oblastí
- Tvar kapky

Tyto informace se váží vždy k jedné dešťové kapce, pravděpodobnost, že přístroj změří dvě prolétávající kapky současně a vyhodnotí tak chybná data je minimální, takže ji můžeme zanedbat. [4]

Tabulka 4 - Ukázka protokolu distrometru – informace o jedné kapce, o efektivním průměru $D = 4,39$ mm [4]

NUMERIC INFO ON SINGLE HYDROMETEOR:					
time	= 00:01:16.856				
equivolumetric diameter	= 4.390 mm				
volume	= 44.298 mm ³				
vertical fall velocity	= 2.15449 m/s				
oblateness	= .48222725				
area for normalisation	= 9764.297 mm*mm				
height of one line	= 6.320000 mm				
type	= not class.				
	FRONT (A)	SIDE (B)			
height	56.880	56.880 mm			
longest line	1.068	1.303 mm			
oblateness	.53258	.43663			
number of lines	9	9			
pixelwidth	0.178000	0.186100 mm			
Pixels in camera A, start at bottom(=line 000)					
000:	433-436	001: 432-437	002: 431-437	003: 431-437	004: 431-437
005:	431-437	006: 431-437	007: 431-436	008: 432-435	
Pixels in camera B, start at bottom(=line 000)					
000:	314-317	001: 313-319	002: 313-319	003: 313-319	004: 313-320
005:	313-320	006: 313-319	007: 314-319	008: 314-319	

4.7 Kalibrace

Jako každý měřicí přístroj, je i videodistrometr nutno kalibrovat, abychom zajistili přesnost měření, které je prováděno non-stop každý den v roce. Při kalibraci videodistrometru se používají náhražky dešťových kapek v podobě ocelových kuliček o průměrech 0,1 – 6 mm. Jelikož je distrometr relativně velké zařízení, většinou je nutné, aby kalibraci prováděli dva

pracovníci. Princip spočívá v tom, že se od určeného času (čas začátku kalibrace se určuje pro snazší nalezení kalibračních dat v celkových datech distrometru) postupně vhazují do měřicí oblasti distrometru již zmíněné ocelové kuličky. Vždy se začíná postupně od nejmenšího, či největšího průměru, to záleží pouze na obsluze. Měřicí oblastí videodistrometru (10 x 10 cm) se nechá propadat vždy určitý počet kuliček jednoho průměru. Pro představu, od začátku kalibrace postupně vhazujeme 10ks kuliček od každého průměru postupně za sebou. Tím končí část kalibrace, věnovaná venkovním prostorům. Po ukončení tohoto procesu se pracovník/pracovníci přesunou do interiérů UFA AV ČR, kde na počítači začnou vyhodnocovat výsledky kalibrace. Samozřejmě je nutno podotknout, že v průběhu kalibrace nesmí pršet, jinak bychom nebyli schopni rozpoznat, co je kapka a co je její náhražka. Dále je nutno dávat pozor na to, abychom při vhazování ocelových náhražek do snímací oblasti videodistrometru nezasáhli jinak než právě těmito kalibračními kuličkami.



Obrázek 17 - Ocelové kuličky: náhražky skutečných kapek pro kalibraci

Ve výstupu distrometru je nutno najít určený čas začátku kalibrace a následně provést kontrolu, zda se v datech objevily simulované kapky ve stejném pořadí, počtu a průměru jako ve skutečnosti. Pokud se tak nestane, přichází na řadu kroky vedoucí ke zjištění problému, který způsobuje, že videodistrometr nedetekuje správně.

5 ZPRACOVÁNÍ DAT Z VIDEODISTROMETRU

Naměřená data putují z videodistrometru do osobního počítače, umístěného uvnitř UFA AV ČR. Výstupem těchto dat jsou soubory s názvy „Vxxxxx.hyd“ a „Vxxxxx.hd“. Tyto soubory jsou pojmenovány následovně: První dvě číslice představují rok a následující tři číslice představují pořadí dne v roce, ve kterém měření probíhalo. To znamená, že každý soubor obsahuje vždy data z jednoho dne v roce. Pro představu měření z pátého ledna roku 2017 vypadá takto: „V17005.hyd/hd“. Pro snadnější orientaci v datech souborů byl jiným diplomantem FEI, panem Vlasákem vytvořen program v MS Excell, který po zadání názvu souboru automaticky vygeneruje datum v klasickém formátu „den/měsíc/rok“. [9]

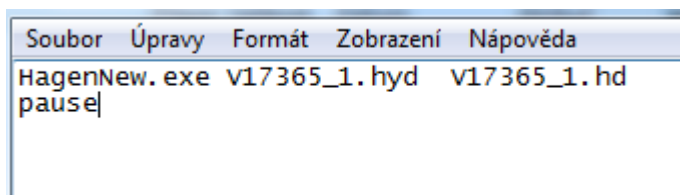
Soubory tohoto typu jsou ovšem zpracovatelné pouze v softwaru vytvořeném a dodaném výrobcem Videodistrometru třetí generace. V tomto softwaru lze vygenerovat grafy a zobrazovat jednotlivé změřené a vypočtené veličiny. Ovšem velkým problémem je spektrum, jelikož firemní software udává pouze spektrum plošné, protože videodistrometr měří plošně a ne v objemu, což je z hlediska většiny výpočtů nedostatečné. Jelikož je nutné znát spektrum objemové, ze kterého se vychází, používá se software MATLAB, ve kterém dokážeme relativně jednoduše DSD další veličiny vypočítat. [9]

5.1 Implementace dat do MATLABU

Jak již bylo řečeno, výchozí binární formát dat z videodistrometru je „.hyd“ nebo „.hd“. Bylo tedy nutné vytvořit program pro převod na formát, podporovaný MATLABEM, což je dílem pana doc. Ing Ondřeje Fišera, CSc. Je to jednoduchý program v prostředí MS-DOS, který převede soubory původního formátu do formátu poznámkového bloku, tedy souboru s příponou „.txt“, který lze snadno využívat a číst z něj v programovacím prostředí již zmíněného jazyka MATLAB. Nevýhodou tohoto převodního programu je fakt, že musíme vždy převádět pouze jediný soubor, tedy každý den zadávat a nechat vygenerovat zvlášť. Na následujících obrázcích je vysvětlen postup při převodu dat pomocí tohoto programu, nazvaného „Hagen_New“.

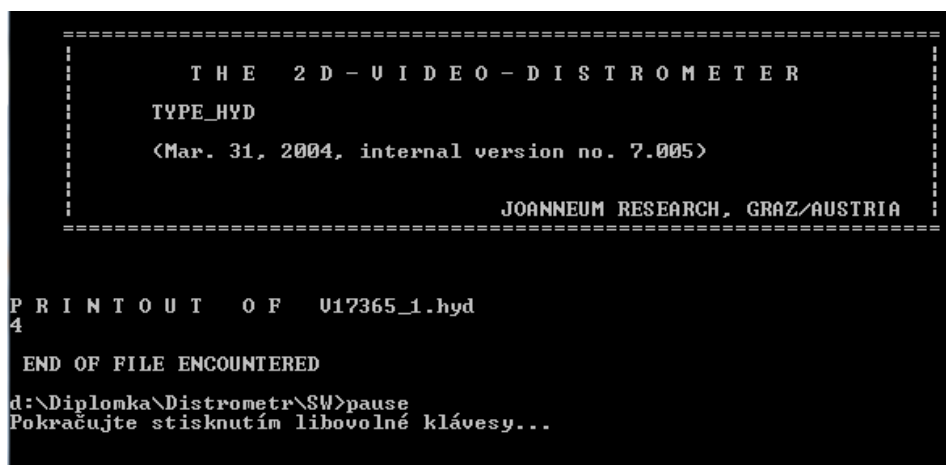
Postup při konvertování souborů programem HagenNew, simulovaný na 365. dni roku 2017:

1. V prvním kroku je potřeba zapsat soubor - den, který chceme konvertovat:



Obrázek 18 - Přepis názvu souboru dle dne, který chceme konvertovat

2. Po uložení přepsaného dne následně spustíme program pro konvertování:



Obrázek 19 - Vlastní konvertování zvoleného souboru

3. Ukázka výstupního souboru po konvertování:

The screenshot shows a text file named '17365.txt' containing a table with 7 columns. The data is as follows:

Soubor	Úpravy	Formát	Zobrazení	Nápověda			
00	44	44.275	0.52	2.60	2.11	1.20	
00	45	14.504	0.35	2.00	1.30	1.43	
00	45	43.443	0.35	2.31	1.30	1.37	
00	48	23.142	0.85	3.43	3.46	1.03	
00	48	43.224	0.75	2.66	3.08	1.06	
00	49	20.427	0.68	2.93	2.80	1.23	
00	49	21.564	0.44	2.48	1.74	1.07	
00	49	49.439	0.51	2.49	2.07	1.15	
00	50	46.403	0.65	3.90	2.68	1.10	
00	51	29.332	0.67	3.51	2.76	1.16	
00	51	34.907	0.56	2.95	2.29	1.06	

Obrázek 20 - Výsledný soubor po konvertování

Jak lze vidět na obrázku výše, ve výstupním souboru se vyskytuje celkem 7 sloupců. Pro snazší orientaci byl vytvořen textový soubor „readme“, který vysvětluje, co představují jednotlivé sloupečky dat změřených videodistrometrem dne 31.12.2017.

readme.txt – Poznámkový blok						
Soubor	Úpravy	Formát	Zobrazení	Nápověda		
hod	min	sek	D [mm]	v1meas m/s	v2comp m/s	oblateness
15	10	54.421	0.55	2.65	2.25	1.02
15	12	13.517	0.34	1.58	1.25	1.16
15	38	55.002	0.61	2.69	2.51	1.33
15	39	14.495	0.67	2.76	2.76	1.25

Obrázek 21 - Popis dat konvertovaného souboru

V popisu dat se zleva nachází:

- Hodina měření
- Minuta měření
- Sekunda měření
- Efektivní průměr dešťové kapky D v milimetrech
- Změřená pádová rychlost kapky na základě vyhodnocení z vysokorychlostních kamer
- Vypočtená pádová rychlost kapky, jejíž výpočet vychází z efektivního průměru kapky
- Oblateness, slangově řečeno „zploštělost“ kapky, ve skutečnosti je to poměr vertikální a horizontální osy dešťové kapky – čím blíže k jedničce, tím kulatější kapka

Po převodech jednotlivých měřených dnů je potom možné vytvořit si v MATLABU databázi dat měření například pro jeden celý rok a počítat spektra a relevantní veličiny pro libovolně dlouhý měřený úsek, což je z více hledisek velmi užitečné. Je tím umožněn například výpočet DSD, kinetických energií kapek, intenzity srážek atd. vztažený pouze k jednomu dni. Nebo naopak získávat výsledky, založené na dlouhodobém pozorování (měření) videodistrometru, a to z libovolně dlouhého časového úseku, limitovaného pouze databází již změřených a zpracovaných dat.

5.2 Výpočet relevantních veličin

Před provedením výpočtů jednotlivých veličin nejdříve definujeme velikost jednotlivých tříd, do kterých řadíme měřené kapky. V našem případě volíme třídy o velikosti od 0 do 10 mm s krokem 0,2 mm. To znamená, že třídíme kapky do 50 tříd s již zmíněným krokem 0,2 mm. Všechny výpočty relevantních veličin se dále počítají vždy pro středy jednotlivých tříd.

Výpočty tříd pro jednotlivé kapky:

$$Třída = \text{ceil}\left(\frac{D}{\Delta}\right) \quad [-], \quad (5.1)$$

kde: D je efektivní průměr kapky [mm],

$\Delta = 0,2$ je krok třídy [mm].

Při dělení se vždy využívá zaokrouhlení na celá čísla. Příklad pro kapku o velikosti 0,3 mm:

$$Třída = \frac{0,3}{0,2} = 1,5 \rightarrow 2, \text{ kapka se řadí do třídy 2, která náleží intervalu } <0,2\text{mm};0,4\text{mm}>.$$

Po zařazení nastupuje filtr tříd kapek, kterým odstraníme nežádoucí, nepřesná data. Jako příklad lze uvést prolétnutí hmyzu měřící oblastí videodistrometru, bez filtru by byl hmyz v datech reprezentován, jako nereálně velká kapka, která by byla brána v potaz při výpočtech.

Následuje výpočet objemu kapky, závislý na změřeném efektivním průměru:

$$V = \frac{4 \cdot \pi \cdot D^3}{24} \quad [\text{mm}^3], \quad (5.2)$$

kde: D je efektivní průměr dešťové kapky (střed třídy) [mm].

Pádová rychlost kapky se aproximuje vztahem:

$$v = 9,65 - 10,3 \cdot e^{-0,6 \cdot D} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}], \quad (5.3)$$

kde: D je efektivní průměr dešťové kapky (střed třídy) [mm].

Kinetická energie dešťové kapky, vztažená pro jednu kapku v dané třídě:

$$W_{kapky} = 0,5 \cdot \rho \cdot V \cdot v^2 \quad [\text{J}], \quad (5.4)$$

kde: $\rho = 1000$ je hustota vody [kg/m^3]

V je objem kapky [m^3],

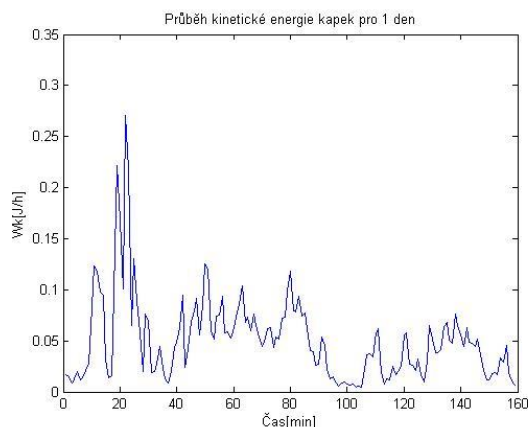
v je vypočtená pádová rychlost kapky [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Kinetická energie dešťových kapek, vztažená k hodině:

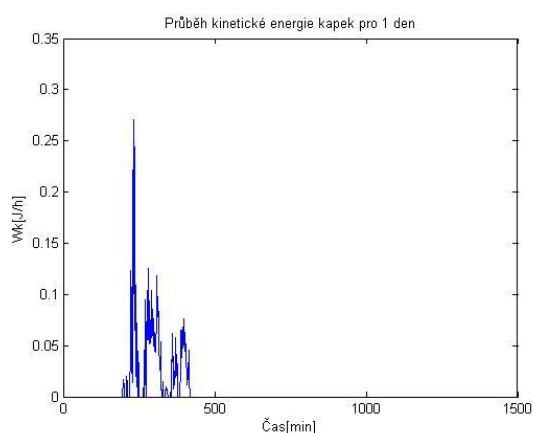
$$W_k = W_{kapky} \cdot N_p(D)_{\min} \cdot 60 \quad [\text{J}/\text{h}], \quad (5.5)$$

kde: W_{kapky} je kinetická energie jedné dešťové kapky [J],

$N_p(D)_{\min}$ je počet kapek o průměru D až dD v jedné minutě [$\text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$].



Obrázek 22 - Kinetická energie kapek_1



Obrázek 23 - Kinetická energie kapek_2

V grafech na obrázcích č.22 a č.23 můžeme vidět průběh kinetické energie pro jeden den, graf vlevo je průběh energie pouze na vybraných minutách ze dne, ve kterých pršelo. Graf vpravo reprezentuje průběh kinetické energie přes celý den (1 den = 1440 minut).

Po jednoduchých výpočtech vybraných veličin následuje další filtr, tentokrát filtr počtu kapek v jedné minutě. Pokud počet kapek v minutě nepřekročí 2 ks/min, z hlediska výpočtů vyzovujeme závěr, že nepršelo.

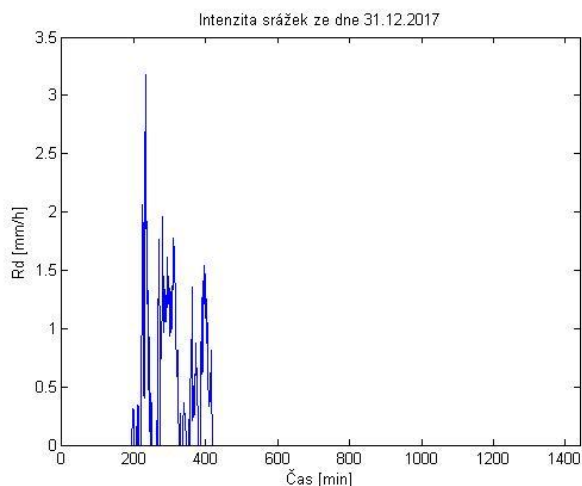
Výpočet intenzity srážek, vztažený pro středy tříd:

$$R_d = \frac{3,6}{10^3} \cdot \int_0^{\infty} V \cdot v(D) \cdot N(D) \cdot dD \quad [\text{mm/h}], \quad (5.6)$$

kde: V je objem kapky [m^3],

$v(D)$ je pádová rychlost kapky, závislá na její velikosti (středu třídy) [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

$N(D)$ je spektrum kapek, vypočtené ze středů tříd [$\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$].



Obrázek 24 - Graf intenzity srážek – 1 den = 1440 minut

Po výpočtu intenzity srážek následuje třetí a poslední filtr, který filtruje právě tuto veličinu. Pokud je intenzita srážek v dané minutě menší, než 0,2 mm/h, z hlediska výpočtů vyvozujeme závěr, že nepršelo.

5.2.1 Analýza bodových grafů

Všechny vytvořené bodové grafy jsme umístili do přílohy A. Většina grafů je věnovaná nalezení veličiny, na které nejvíce záleží kinetická energie deště. Hledali jsme, na kterém momentu (M2-M6) nejlépe závisí kinetická energie. Z grafů i regresních rovnic včetně jejich korelací jsme zjistili, že kinetická energie se více blíží zvyšujícím se momentům až k momentu M5. Na momentu M6 závisí již opět méně. Závěrem lze konstatovat, že výborná korelace byla nalezena mezi kinetickou energií a pátým momentem spektra. Pro tuto závislost jsme navrhli jako nejvhodnější lineární model ve tvaru (korelace lepší než 99%):

$$W_k = 0,0006 \cdot M5 - 0,0013 \quad [\text{J/h}], \quad (5.7)$$

kde, $M5$ je pátý moment spektra [$\text{mm}^5 \cdot \text{m}^{-3}$].

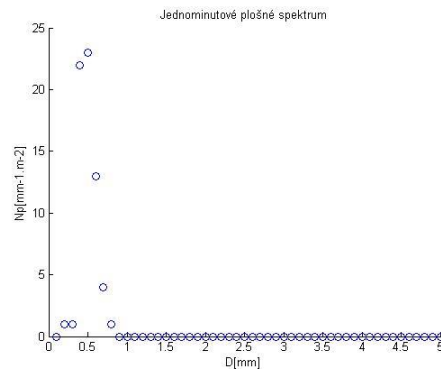
Polynom druhého stupně pro jeho formální složitost nedoporučuji pro tuto aproximaci, i když má korelaci lepší o dvě deseti tisíce.

Dále jsme testovali závislost šestého momentu (což je přesně faktor radarové odrazivosti) na intenzitě srážek, přičemž jsme nepoužívali logaritmickou formu faktoru radarové odrazivosti. Navrhli jsme dvě aproximace – polynom druhého stupně vychází lépe (84%) a exponenciální aproximaci (75%).

5.3 Výpočet objemových a plošných spekter kapek

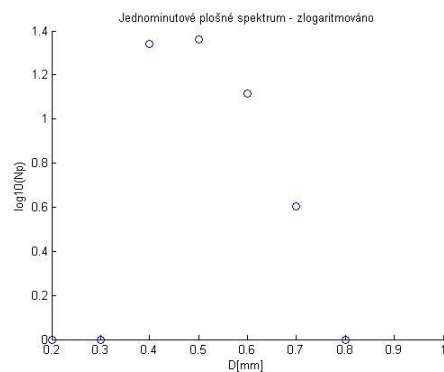
5.3.1 Jednominutové plošné spektrum N_p

V našem případě jednominutové plošné spektrum kapek udává závislost počtu kapek v 1 minutě na jejich průměru, respektive středu třídy, ve které se dané kapky pohybují.



Obrázek 25 - Jednominutové plošné spektrum kapek

Pro jednodušší pochopení jednominutového plošného spektra kapek: Jak lze vidět na grafu plošného spektra kapek, v jedné naměřené minutě dešťových srážek byly 4 kapky patřící do třídy 2 (třída 2 obsahuje kapky o efektivním průměru patřícím do intervalu $\langle 0.2 \text{ mm}; 0.4 \text{ mm} \rangle$), v grafu na ose x reprezentována středem třídy o velikosti 0,3 mm. Dále 14 kapek o efektivním průměru (středu třídy) 0,5mm, tzn. 14 kapek, patřících do třídy 3, která obsahuje všechny kapky o velikosti $\langle 0,4\text{mm}; 0,6\text{mm} \rangle$, atd. Body reprezentující počty kapek v jednotlivých třídách v jedné minutě přes všechny třídy poté tvoří jednominutové plošné spektrum kapek.



Obrázek 26 - Jednominutové plošné spektrum kapek – zlogaritmováno

5.3.2 Jednominutové objemové spektrum $N(D)$

Jak bylo již řečeno v kapitole 2.5, v praxi se definuje součin $N(D).dD$, jako počet kapek o efektivním průměru D až $D+dD$ v jednotce objemu. Nejdříve je nutné vypočítat objem, ke kterému bude spektrum vztaženo: [9]

$$V = S \cdot h \quad [\text{m}^3], \quad (5.7)$$

kde: S je velikost snímací plochy videodistrometru $[\text{m}^2]$,

h je délka dráhy dešťové kapky za jednotku času $[\text{m}]$.

Délka dráhy bude pro každou kapku jiná, vztah pro její výpočet je dán vzorcem: [9]

$$h = v \cdot t_i \quad [\text{m}], \quad (5.8)$$

kde: v je pádová rychlost kapky $[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$

t_i je integrační čas $[\text{s}]$ (volíme 60 s).

Objemové spektrum je tedy dáno vztahem: [9]

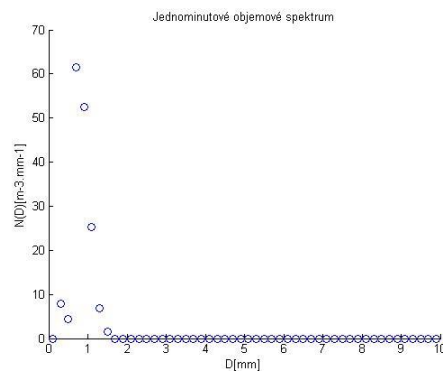
$$N(D) = \frac{N_p(D)}{V \cdot \Delta} \quad [\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}], \quad (5.9)$$

kde: $N(D)$ je objemové spektrum kapek v dané třídě $[\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}]$,

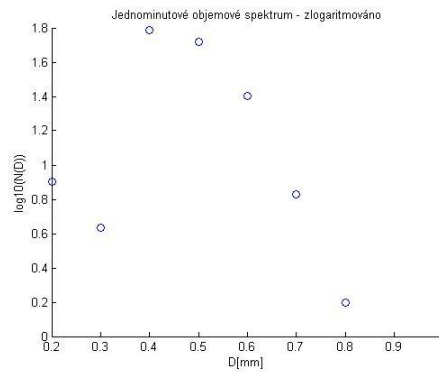
N_p je plošné spektrum kapek, tedy počet kapek v dané třídě $[\text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}]$,

V je objem, ke kterému je spektrum $N(D)$ vztaženo $[\text{m}^3]$,

$\Delta = 0,2$ je krok třídy $[\text{mm}]$.



Obrázek 27 - Jednominutové objemové spektrum kapek

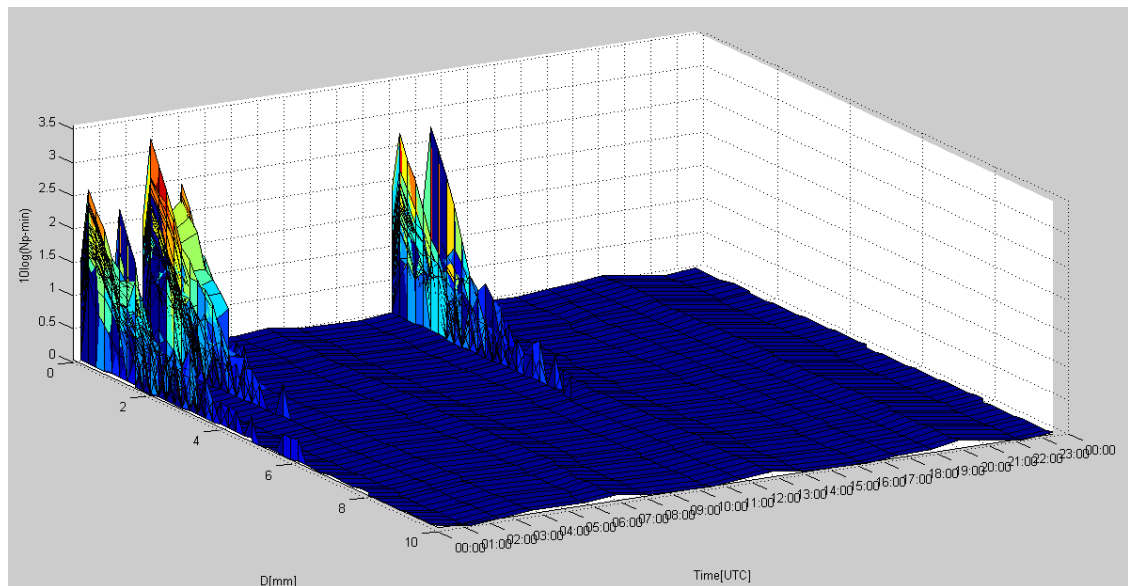


Obrázek 28 - Jednominutové objemové spektrum-zlogaritmováno

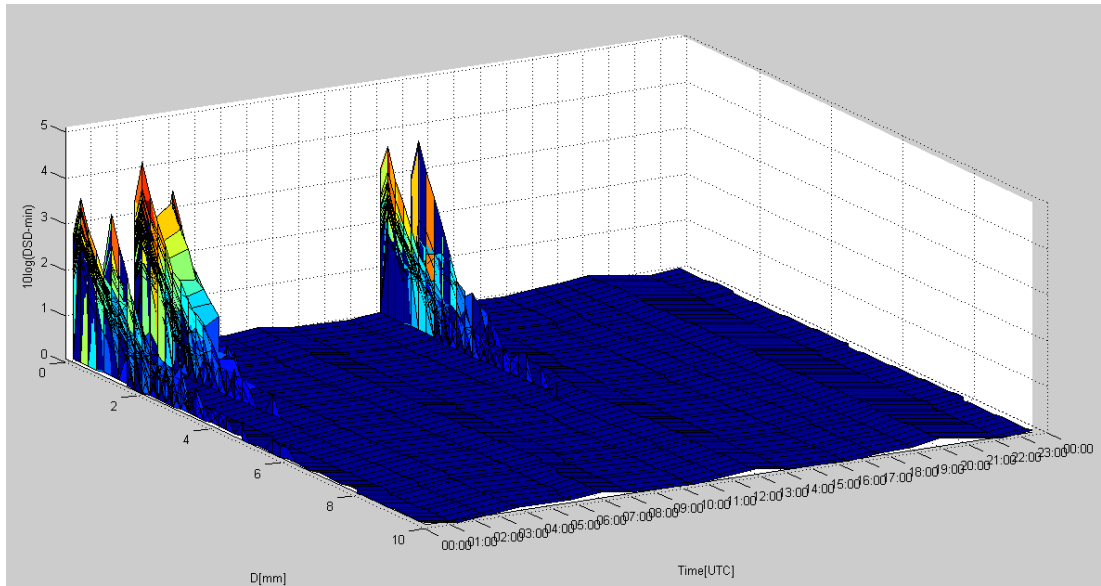
5.4 Průměrná denní plošná a objemová spektra

Jelikož data zpracováváme do podoby jednominutových spekter kapek, pro jednodenní časové období je nutné tyto spektra zprůměrovat tak, aby ve výsledku vzniklo spektrum, jehož body reprezentují průměrnou hodnotu (+/- směrodatná odchylka) spektra pro danou třídu v období jednoho dne. Tento krok je nutný pro další výpočty, respektive aproximace spekter.

Nezprůměrovaná jednominutová spektra pro jeden den jsou nejlépe vizualizována pomocí 3D grafů.



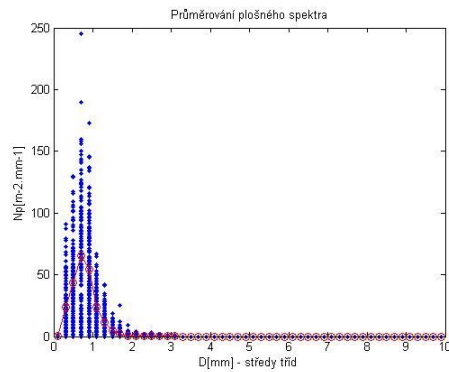
Obrázek 29- 3D graf plošného spektra pro jeden den – zlogaritmováno



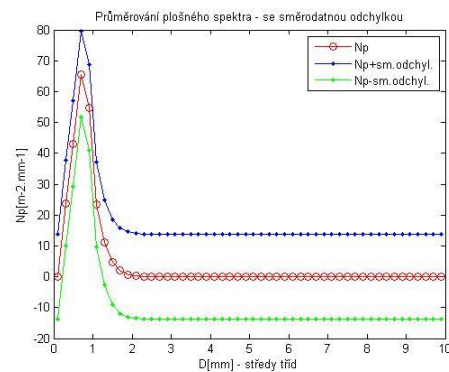
Obrázek 30 - 3D graf objemového spektra pro jeden den – zlogaritmováno

V obou 3D grafech jsou reprezentovány obě spektra v logaritmické míře, efektivní průměr kapek, respektive středy tříd a čas měření od půlnoci do půlnoci měřeného dne.

5.4.1 Průměrné denní plošné spektrum

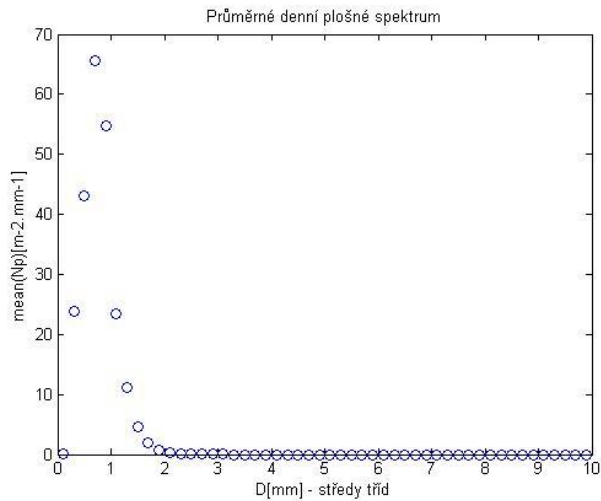


Obrázek 31 - Průměrování N_p pro jeden den

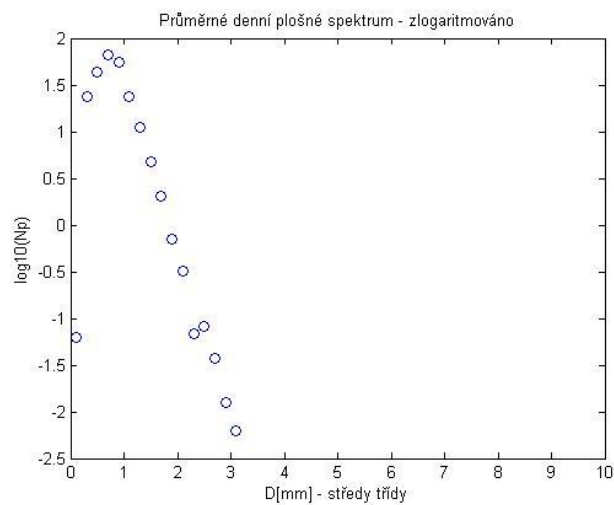


Obrázek 32 - N_p +/- směrodatná odchylka

V grafu průměrování plošného spektra dominují modré body, které představují hodnoty plošného spektra pro všechny minuty, ve kterých došlo ke srážkám v dané třídě za období jednoho dne. Červené body pak reprezentují průměrnou hodnotu plošného spektra kapek pro danou třídu. Vzniká tedy jednodenní plošné spektrum kapek.

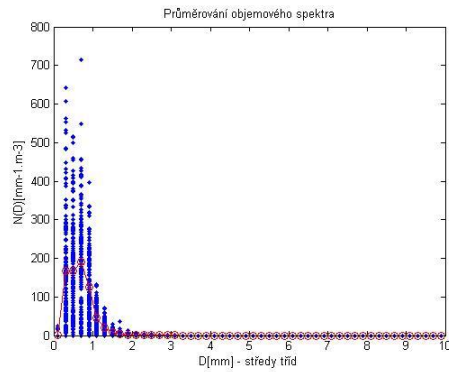


Obrázek 33 - Průměrné denní plošné spektrum

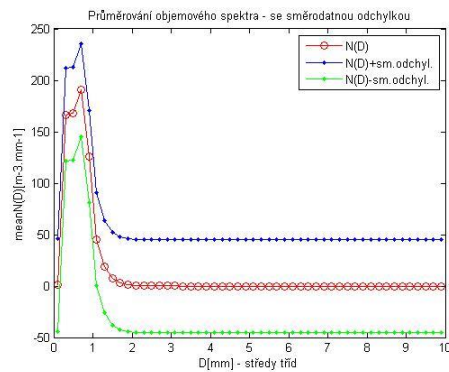


Obrázek 34 - Průměrné denní plošné spektrum-zlogaritmováno

5.4.2 Průměrné denní objemové spektrum

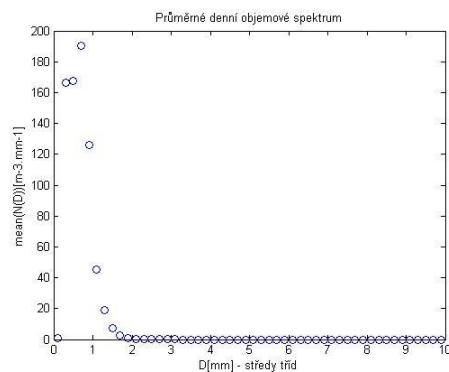


Obrázek 35 - Průměrování $N(D)$

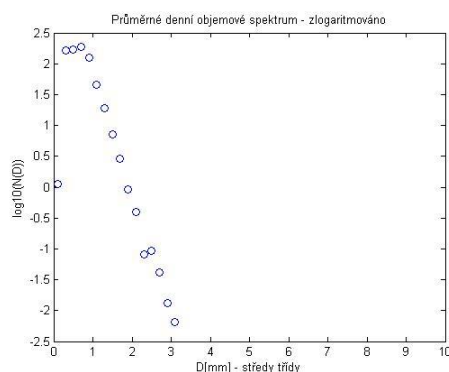


Obrázek 36 - $N(D) \pm$ směrodatná odchylka

U objemového spektra dochází ke zprůměrování hodnot pro všechny minuty ve třídách obdobně jako u spektra plošného. Na grafu výše lze pak vidět průběh objemového spektra pro jeden den, včetně směrodatné odchylky.



Obrázek 37 - Průměrné denní $N(D)$



Obrázek 38 - Průměrné denní $N(D)$ - zlogaritmováno

5.5 Výpočet momentů spektra DSD

V této diplomové práci je počítáno celkem 7 momentů objemového spektra dešťových kapek DSD. Následně jsou zkoumány závislosti těchto momentů spektra na některých relevantních veličinách.

$$M_x = \int_0^{\infty} D^x \cdot N(D) \cdot dD \quad [\text{mm}^x \cdot \text{m}^{-3}], \quad (5.10)$$

kde: M_x je x -tý moment spektra kapek $[\text{mm}^x \cdot \text{m}^{-3}]$,
 D je efektivní průměr kapky (střed třídy) $[\text{mm}]$,
 $N(D)$ je spektrum kapek $[\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}]$.

Často se však momenty spektra udávají v logaritmické míře:

$$M_x = 10 \cdot \log_{10} \left\{ \int_0^{\infty} D^x \cdot N(D) \cdot dD \right\}, \quad (5.11)$$

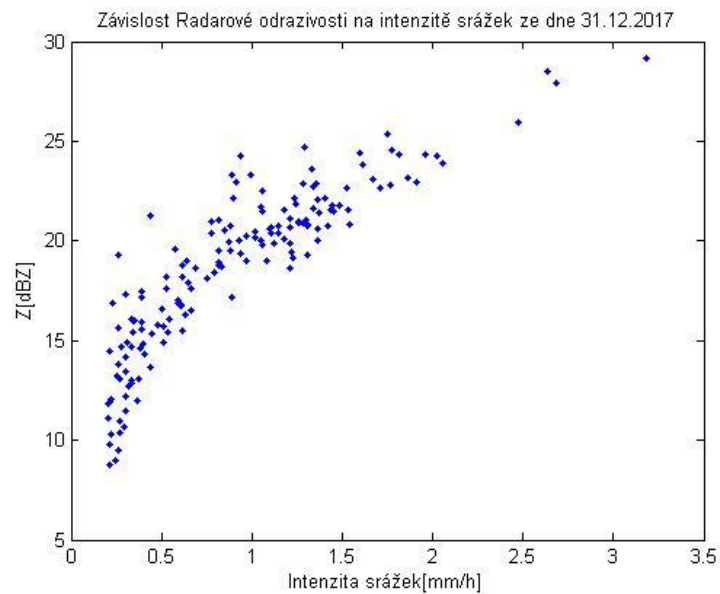
kde: M_x je x -tý moment spektra kapek,
 D je efektivní průměr kapky (střed třídy) $[\text{mm}]$,
 $N(D)$ je spektrum kapek $[\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}]$.

Ze znalosti momentů spektra DSD můžeme přímo vyčíslit některé hledané veličiny. Jednou z nich je faktor radarové reflektivity, který je přímo šestým momentem objemového spektra dešťových kapek DSD.

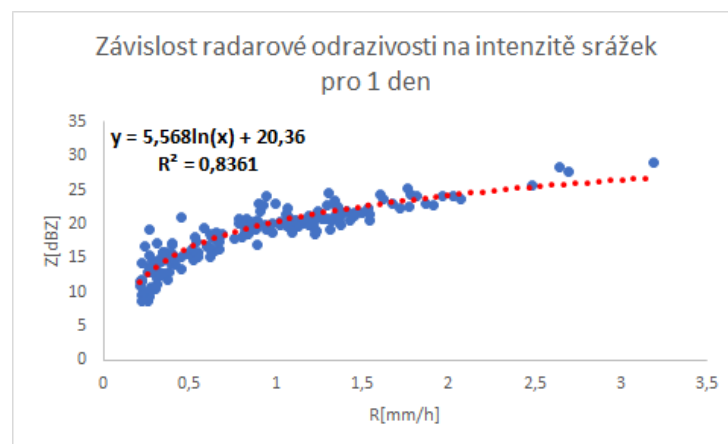
$$Z = 10 \cdot \log_{10} \left\{ \int_0^{\infty} D^6 \cdot N(D) \cdot dD \right\} \quad [\text{dBZ}], \quad (5.12)$$

kde: D je efektivní průměr kapky (střed třídy) $[\text{mm}]$,
 $N(D)$ je spektrum kapek $[\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}]$.

Z rovnice radarové reflektivity vyplývá, že k faktoru radarové odrazivosti přispívá součin šesté mocniny průměru kapky a spektra $N(D)$. [4]



Obrázek 39 - Závislost vypočtené radarové odrazivosti na intenzitě srážek

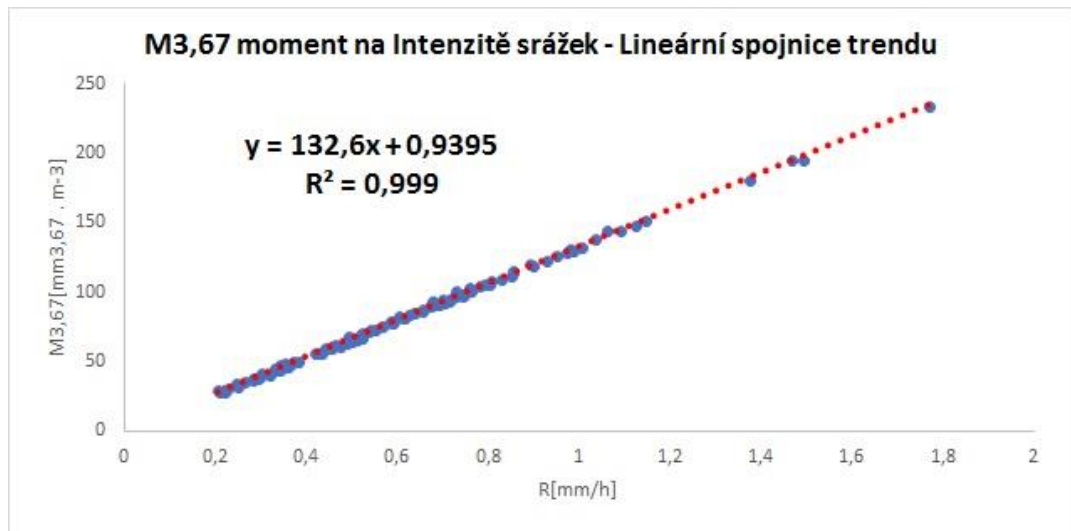


Obrázek 40 - Závislost radarové odrazivosti na intenzitě srážek-regrese

Z grafů závislosti radarové reflektivity na intenzitě srážek můžeme vyvozovat závěr, že závislost má logaritmický charakter, důkazem tohoto tvrzení je provedení regrese a vyčíslení této závislosti, včetně hodnoty spolehlivosti R . Tuto skutečnost jsme si dále potvrdili i na jiných měřeních dnes v roce 2017.

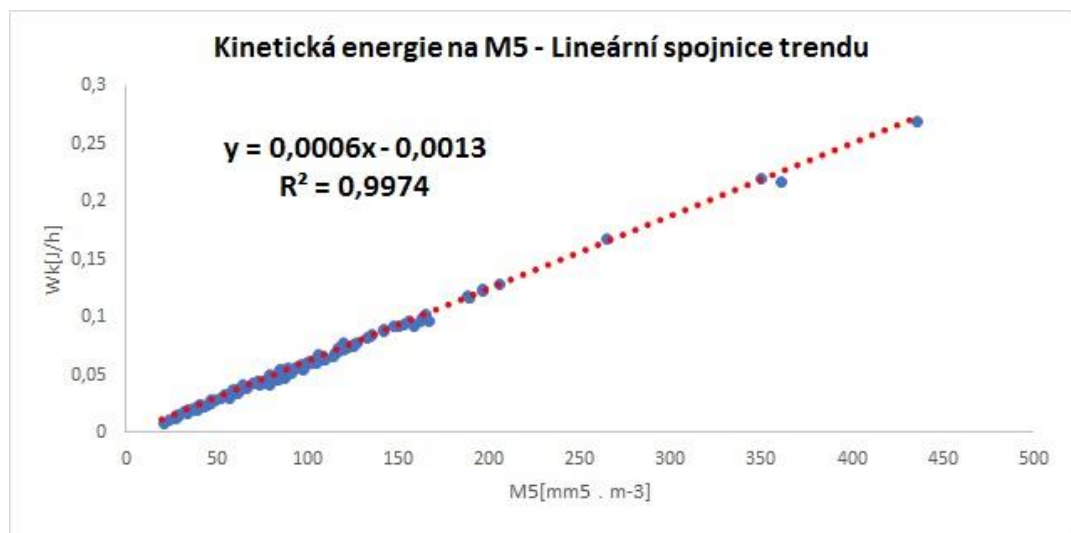
Pokud za proměnnou x při výpočtu momentů spektra dosadíme číslo 3,67, vzniká moment, který je přímo korelovaný s intenzitou srážek. Závislost mezi těmito dvěma veličinami je

lineární přímka. Jako u předešlého momentu tuto skutečnost doložíme grafem a vyčíslíme závislost a hodnotu spolehlivosti R.



Obrázek 41 – Závislost M3,67 na intenzitě srážek

Při počítání momentů spektra DSD a jejich grafické reprezentaci došlo i ke zjištění, které nebylo doposud známo. Závislost mezi pátým momentem spektra a kinetickou energií dešťových kapek je lineární.



Obrázek 42 - Závislost kinetické energie a M5

Další grafy závislostí vybraných momentů a veličin jsou přiloženy v příloze této diplomové práce.

6 ANALYTICKÉ APROXIMACE DSD

V následující kapitole budeme hledat nejvhodnější analytické aproximace spekter DSD. Přičemž zkoumané budou tři druhy aproximací. Aplikovat je budeme jak na jednodenní spektra, tak i na jednodenní průměrná spektra. Jelikož jsme si ze spektra již spočítali jednotlivé momenty, pro realizaci jednotlivých modelů využíváme momentovou metodu – analytické aproximace vypočítané na základě momentů spektra.

6.1 Exponenciální model N(D)

Exponenciální aproximace spektra je dána vztahem:

$$N_{exp}(D) = N_0 \cdot e^{(-\lambda \cdot D)} \quad [\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}], \quad (6.1)$$

kde: N_0, λ jsou parametry exponenciálního modelu,

D je efektivní průměr kapky (střed třídy) [mm].

Abychom byli schopni vyčíslit jednotlivé hodnoty N_{exp} , je nutné nejprve určit parametry tohoto modelu:

$$N_0 = 98,65 \cdot M_3 \cdot \left(\frac{M_3}{M_6}\right)^{\frac{4}{3}} \quad [\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}], \quad (6.2)$$

kde: M_3 je třetí moment spektra, který je úměrný hodnotám intenzity srážek

$[\text{mm}^3 \cdot \text{m}^{-3}]$,

M_6 je šestý moment spektra, představující hodnotu faktoru radarové odrazivosti

$[\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}]$.

$$\lambda = 4,93 \cdot \left(\frac{M_3}{M_6}\right)^{\frac{1}{3}} \quad [\text{mm}^{-1}], \quad (6.3)$$

kde: M_3 je třetí moment spektra, který je úměrný hodnotám intenzity srážek

$[\text{mm}^3 \cdot \text{m}^{-3}]$,

M_6 je šestý moment spektra, představující hodnotu faktoru radarové odrazivosti

$[\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}]$.

6.2 Marshall-Palmer model $N(D)$

Marshall-Palmer model je obdoba exponenciálního modelu spektra DSD. Vztah pro jeho výpočet je shodný s předchozím modelem, ale parametry se vypočítají odlišně:

$$N_{MP}(D) = N_0 \cdot e^{(-\lambda \cdot D)} \quad [\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}], \quad (6.4)$$

kde: N_0, λ jsou parametry Marshall-Palmer modelu,

D je efektivní průměr kapky (střed třídy) [mm].

Parametr N_0 je v tomto případě konstanta rovna hodnotě 8000, parametr λ se vypočítá následovně:

$$\lambda = \frac{4,1}{R^{0,21}} \quad [\text{mm}^{-1}], \quad (6.5)$$

kde: R je intenzita srážek [mm/h].

6.3 Gamma model $N(D)$

V určení Gamma aproximace z momentů spektra DSD vycházíme z některých výpočtů metody určení typu deště Tokay-Short. [13]

$$N_{gamma}(D) = N_0 \cdot D^\mu \cdot e^{(-\lambda \cdot D)} \quad [\text{mm}^{-1-\mu} \cdot \text{m}^{-3}], \quad (6.6)$$

kde: μ, N_0, λ jsou parametry Gamma modelu,

D je efektivní průměr kapky (střed třídy) [mm].

Abychom se postupně dostali až k výpočtu parametru N_0 , je nutné provést některé mezi výpočty, jako je například určení pomocného parametru G : [13]

$$G = \frac{M_4^3}{M_3^2 \cdot M_6} \quad [-], \quad (6.7)$$

kde: M_3, M_4, M_6 jsou momenty spektra [$\text{mm}^x \cdot \text{m}^{-3}$].

Po vyčíslení parametru G lze následně přejít k výpočtu parametru μ : [13]

$$\mu = \frac{11 \cdot G - 8 + [G \cdot (G + 8)]^{\frac{1}{2}}}{2 \cdot (1 - G)} \quad [-], \quad (6.8)$$

kde: G je pomocný parametr [-].

Nyní již lze přejít k výpočtu parametru λ : [13]

$$\lambda = \frac{(\mu+4).M3}{M4} \quad [\text{mm}^{-1}], \quad (6.9)$$

kde: $M3, M4$ jsou momenty spektra [$\text{mm}^x.\text{m}^{-3}$],

μ je parametr Gamma modelu [-].

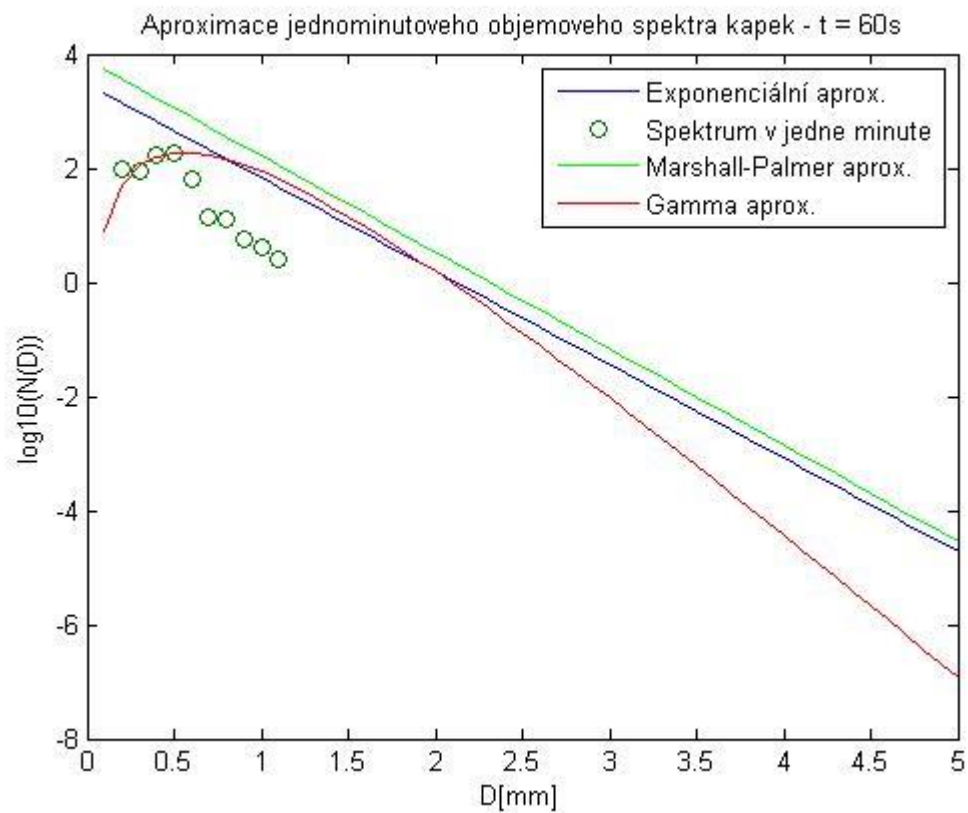
Po provedení jednotlivých výpočtů se nakonec vypočítá parametr N_0 pro Gamma model: [13]

$$N_0 = \frac{\lambda^{(\mu+4)}.M3}{\Gamma(\mu+4)} \quad [\text{m}^{-3}.\text{mm}^{-1}], \quad (6.10)$$

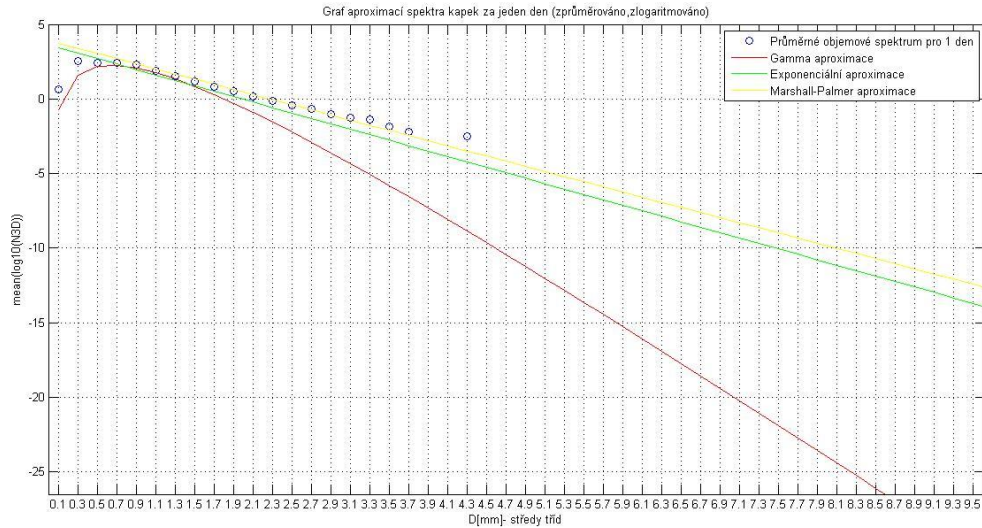
kde: λ, μ jsou parametry Gamma modelu,

$M3$ je třetí moment spektra, který se blíží hodnotám intenzity srážek [$\text{mm}^3.\text{m}^{-3}$],

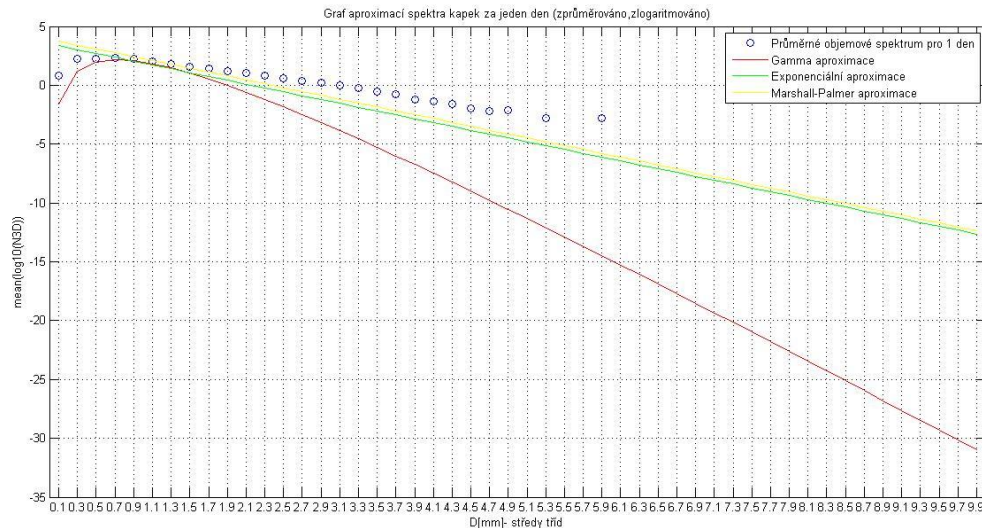
Γ je gamma funkce.



Obrázek 43 - Analytické aproximace pro jednodominutové spektrum $N(D)$



Obrázek 44 - Aproximace denního průměrného spektra $N(D)$ ze dne 31.12.2017



Obrázek 45 - Aproximace denního průměrného spektra $N(D)$ ze dne 29.6.2017

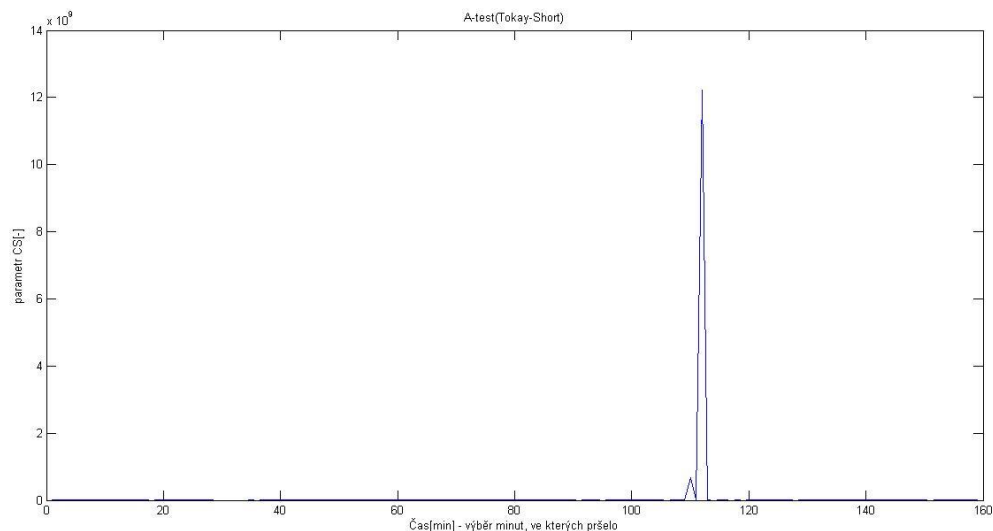
Z hlediska aproximací jednodenního spektra nedochází k přesnému proložení bodů, jelikož využíváme momentovou metodu výpočtu aproximačních modelů spektra, regresní metoda by byla přesnější. Nicméně z hlediska výpočtů DSD je tento způsob výpočtu brán, jako relevantní a směrodatný. Model Marshall-Palmer vypočten z intenzity srážek, která je spočtena z rovnice (4.6), tedy ze spektra $N(D)$.

V aproximaci jednodenního průměrného spektra je již proložení lepší a z grafů lze vyvodit závěr, že se spektrum pro malé průměry kapek nejdříve blíží tvaru Gamma modelu a pro dešťové kapky větších průměrů se dále jeví jako nejlepší model Marshall-Palmer (exponenciální).

Dle dostupných materiálů by se mělo spektrum nejdříve blížit tvaru Gamma modelu, a to pro průměry kapek od 0,3mm do 1,1mm. Pro větší průměry by pak měla být nejvhodnější aproximace typu exponenciální. [14]

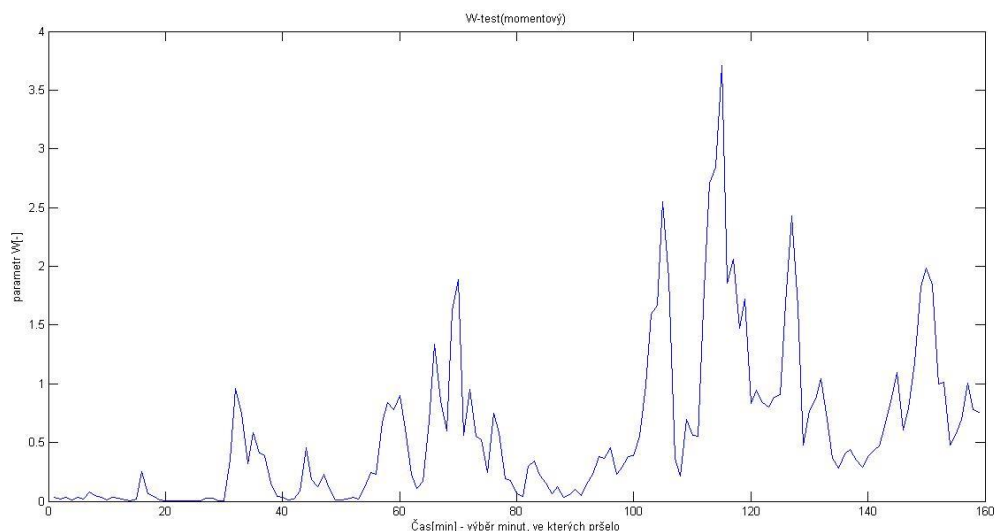
7 VÝPOČTY PRO RŮZNÉ TYPY DEŠŤŮ

Jak již bylo psáno v kapitole 2.2, v této diplomové práci dělíme dešť na dva druhy. Prvním druhem je stratiformní dešť a druhým je konvektivní dešť. Pro zjištění typu deště z měřených dat videodistrometru používáme již také zmíněné testy. V interpretaci výsledků jednotlivých dešťů jsme ale narazili na problém. Výstupem Tokay-Short A-testu byly velice nepřehledné hodnoty parametru CS, lišící se i o několik řádů. Po konzultaci s vedoucím práce bylo rozhodnuto, že hlavním a jediným kritériem pro určení typu deště bude W-test. Důvodem je skutečnost, že je A-test navržený pro tropické oblasti, ve kterých je spektrum, respektive přímo dešťové srážky jiné, než je tomu v našich podnebních podmínkách.



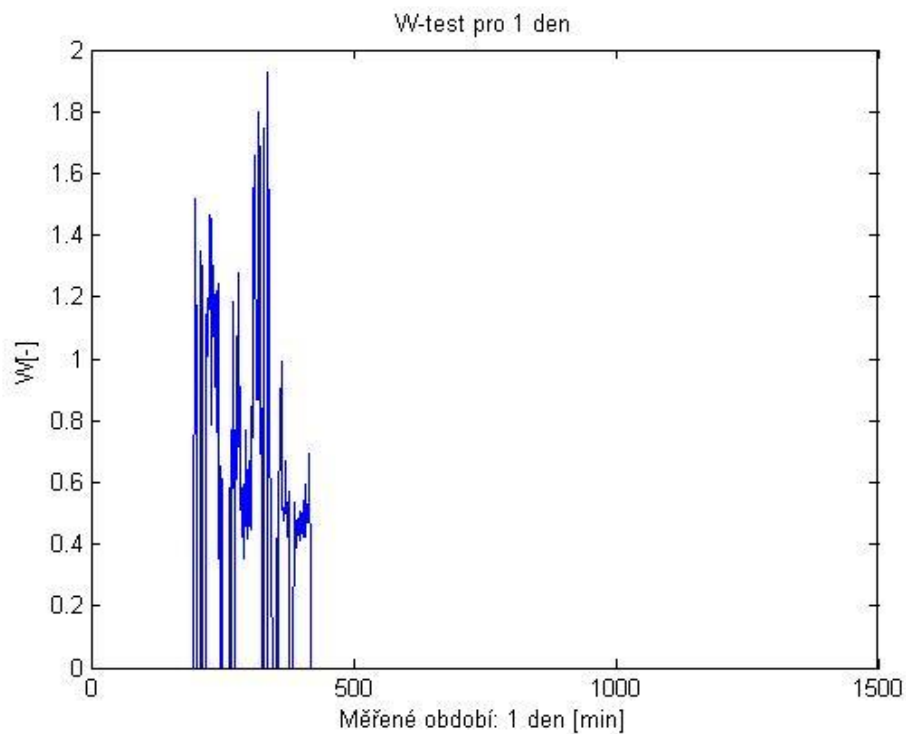
Obrázek 46 - A-test pro jeden den

Oproti testu Tokay-Short vychází W-test podle předpokladů, v závislosti na změřených datech se křivka, představující průběh parametru W pohybuje v závislosti na čase srážek okolo rozhodovací úrovně a nijak extrémně nevybočuje. Díky tomuto faktu můžeme jednoduše určit kdy byl v rozmezí jednoho měřeného dne charakter deště konvektivní a kdy vrstevnatý. Také lze určit časy přechodů z jednoho typu deště na druhý.



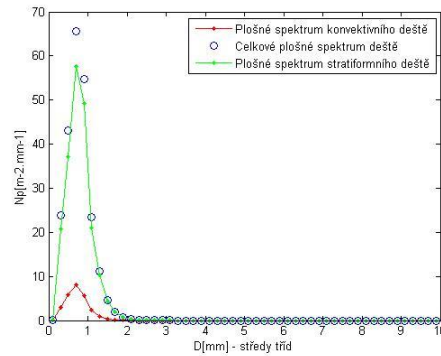
Obrázek 47 - W-test pro jeden den_1

Z grafu W-testu (obrázek 47) ze dne 31.12.2017 je dobře vidět, jak se v čase, kdy pršelo, vyvíjel parametr určující typ srážek. Na ose X jsou vyneseny pouze minuty, ve kterých docházelo k dešťovým srážkám. Pokud bychom chtěli určovat přesný čas, kdy docházelo například k přechodům mezi stratiformním a konvektivním typem deště, osu x bychom roztáhli pro období celého měřeného dne. Průběh parametru W přes celý den lze vidět na grafu níže.



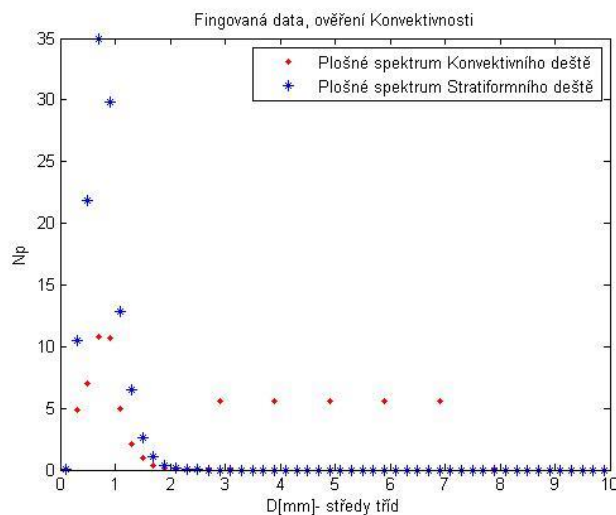
Obrázek 48 - W-test pro jeden den_2

Po rozdělení dat do minut z měřeného dne, ve kterých figurují stratiformní nebo konvektivní dešťové srážky, jsou následně provedeny výpočty spekter (plošného a objemového) společně s momenty těchto spekter a další výpočty relevantních veličin. Pro ilustraci jsou níže uvedeny grafy konvektivních a stratiformních průměrných denních spekter. Výpočty momentů atd. jsou poté analogicky prováděny, jako tomu bylo pro nerozdělená data.



Obrázek 49 - Plošné spektrum pro různé typy deště

Z plošného spektra je zřejmé, že stratiformní typ dešťových srážek obsahuje mnohem méně velkých kapek než druhý typ. Toto tvrzení jsme si potvrdili tím, že jsme si udělali testovací data, která obsahovala velké množství kapek většího průměru, protože v našem podnebí, minimálně za sledovaný rok 2017 neexistuje měřený den, kdy by byl počet velkých kapek natolik dostačující, aby se objevil opačný rozdíl mezi spektry konvektivního a stratiformního typu dešťových srážek.



Obrázek 50 - Plošné spektrum z testovacích dat

Jak lze vidět na grafu plošného spektra z testovacích dat, naše hypotéza byla přijata. Konvektivní plošné spektrum převládá při přítomnosti velkých dešťových kapek a stratiformní

při přítomnosti kapek malých. Z tohoto vyvozujeme závěr, že stratiformní dešť je převážně tvořen malými kapkami a konvektivní dešť převážně kapkami o větších průměrech, samozřejmě při testování typologie deště pomocí W-testu.

8 VÝPOČET MĚRNÉHO ÚTLUMU

Jak bylo již psáno, každá dešťová kapka hraje svoji roli při střetu s elektromagnetickou vlnou, šířící se atmosférou. Část energie vlny se v kapce přemění na teplo, část se absorbuje v kapce a část je vlivem indukovaných elektrických proudů rozptýlena. Z tohoto faktu vyplývá, že dochází k utlumení elektromagnetické vlny, tedy útlumu. [10]

8.1 Rozptylová funkce

Pro popis negativních vlastností dešťové kapky na elektromagnetickou vlnu, tedy útlumu a rozptylu slouží směrové amplitudové komplexní rozptylové funkce \mathbf{f} , nebo \mathbf{S} . Tyto rozptylové funkce popisují vztah mezi fázorem intenzity elektrického pole dopadajícím na dešťovou kapku a fázorem intenzity elektrického pole, odraženým, respektive rozptýleným od dešťové kapky. Každá rozptylová funkce je závislá na směru šíření dopadající elektromagnetické vlny a směru šíření vlny odražené. Vztah mezi těmito dvěma vlnami je popsán právě v rozptylové funkci. Tento vztah je kromě směru šíření dopadající a odražené vlny dále závislý na dalších veličinách, jako jsou komplexní permitivita a tvar dešťové kapky nebo poloha polarizační roviny dopadající vlny vůči kapce. Nutno dodat, že při výpočtu rozptylových funkcí nedochází k velkým nepřesnostem, jelikož elektromagnetická vlna, vyslaná libovolnou anténou se v její vzdálené zóně chová jako vlna rovinná, příčná. Takže dopadající vlnou na dešťovou kapku lze chápat právě rovinnou, příčnou vlnu. [10]

Při stanovení rozptylové funkce na dešťové kapce jsou definovány funkce f , nebo S pro různé polarizace. Ve výpočtu měrného útlumu figuruje rozptylová funkce f , představující dopřednou rozptylovou funkci v různých polarizacích (horizontální, vertikální). [10]

$$\hat{E}^s = \hat{E}^i \cdot f(\vec{K1}, \vec{K2}) \cdot (r^{-1}) \cdot (e^{j \cdot k_0 \cdot r}) \quad [\text{V/m}], \quad (8.1)$$

kde: E^s je fázor rozptýleného elektrického pole [V/m],
 E^i je fázor dopadajícího elektrického pole [V/m],
 $f(K1, K2)$ je dopředná rozptylová funkce dešťové kapky [m],
 $K1$ je směr dopadající vlny,
 $K2$ je směr rozptýlené vlny,
 r je vzdálenost rozptýleného elektrického pole od středu kapky,
 k_0 je vlnové číslo vakua [m^{-1}].

Při výpočtu měrného útlumu způsobeného dešťovými kapkami se využívá dopředný rozptyl, který nastává v případě rovnosti $\vec{K1} = \vec{K2}$. Dopředné rozptylové funkce se počítají pro vertikální a horizontální polarizaci \hat{f}_v, \hat{f}_h , přičemž směr šíření dopadající elektromagnetické vlny je rovnoběžný s hlavní osou kapky, nebo je na ní kolmý. [10]

Tabulka 5 – Ukázka hodnot dopředné rozptylové funkce v závislosti na průměru kapky, zde pro $f = 18,95\text{GHz}$ [11]

f = 18,95GHz						
HP, elevation $\varphi = 0^\circ$			VP, elevation $\varphi = 0^\circ$		VP, HP, elevation $\varphi = 90^\circ$	
D[mm]	Re(f)	Im(f)	Re(f)	Im(f)	Re(f)	Im(f)
0.5	2.306E-06	1.818E-07	2.300E-06	1.810E-07	2.306E-06	1.818E-07
1	1.917E-05	2.305E-06	1.882E-05	2.240E-06	1.916E-05	2.290E-06
1.5	6.772E-05	1.395E-05	6.451E-05	1.304E-05	6.771E-05	1.360E-05
2	1.592E-04	5.454E-05	1.486E-04	5.011E-05	1.623E-04	5.337E-05
2.5	3.007E-04	1.532E-04	2.603E-04	1.296E-04	3.097E-04	1.462E-04
3	4.835E-04	3.247E-04	3.941E-04	2.532E-04	5.109E-04	3.146E-04
3.5	6.916E-04	6.311E-04	5.399E-04	4.351E-04	7.609E-04	6.246E-04
4	8.361E-04	1.086E-03	6.764E-04	6.809E-04	9.710E-04	1.116E-03
4.5	8.461E-04	1.615E-03	7.796E-04	9.744E-04	1.048E-03	1.727E-03
5	7.377E-04	2.119E-03	8.435E-04	1.290E-03	9.826E-04	2.356E-03
5.5	5.922E-04	2.550E-03	8.811E-04	1.600E-03	8.424E-04	2.937E-03
6	4.901E-04	2.936E-03	9.220E-04	1.894E-03	7.008E-04	3.476E-03
6.5	4.642E-04	3.346E-03	9.962E-04	2.182E-03	5.967E-04	4.017E-03
7	4.908E-04	3.857E-03	1.121E-03	2.489E-03	5.349E-04	4.614E-03
7.5	5.060E-04	4.493E-03	1.290E-03	2.858E-03	5.058E-04	5.283E-03
8	4.271E-04	5.243E-03	1.482E-03	3.302E-03	4.711E-04	6.076E-03

8.2 Realizace výpočtu měrného útlumu

Výpočet měrného útlumu, způsobeného dešťovými kapkami je dán vztahem: [4]

$$\alpha = 4.3434 \cdot \lambda \cdot 10^3 \cdot \int_0^\infty \text{Im}\{f(D)\} \cdot N(D) \cdot dD \quad [\text{dB/km}], \quad (8.2)$$

kde: λ je vlnová délka [m],

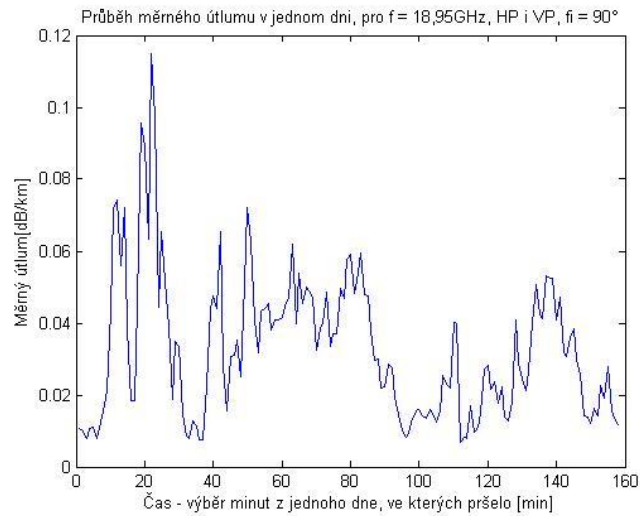
$f(D)$ je dopředná rozptylová funkce kapky [m],

$N(D)$ je spektrum dešťových kapek [$\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$],

D je efektivní průměr kapky (střed třídy) [mm].

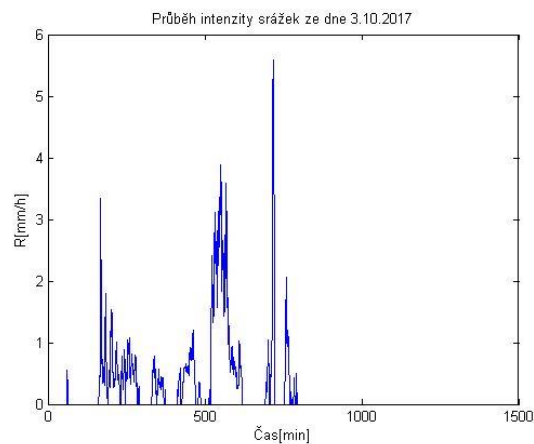
Měrný útlum nám tedy dává hodnotu o kolik dB se signál (šířící se elektromagnetická vlna prostorem) utlumí s každým uraženým kilometrem. Výpočet útlumu byl proveden pro tabelované hodnoty dopředné rozptylové funkce, tedy pro frekvence 18,95GHz; 39,592GHz a

49,49GHz o různých polarizacích a elevaci. Ilustraci průběhu měrného útlumu v jednom dni lze vidět na obrázku 51.

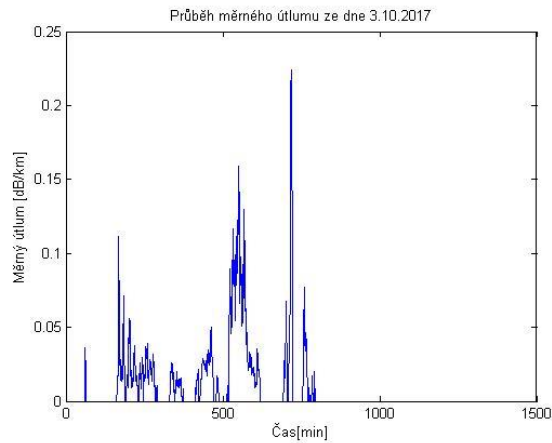


Obrázek 51 – Průběh spočteného měrného útlumu ze dne 31.12.2017

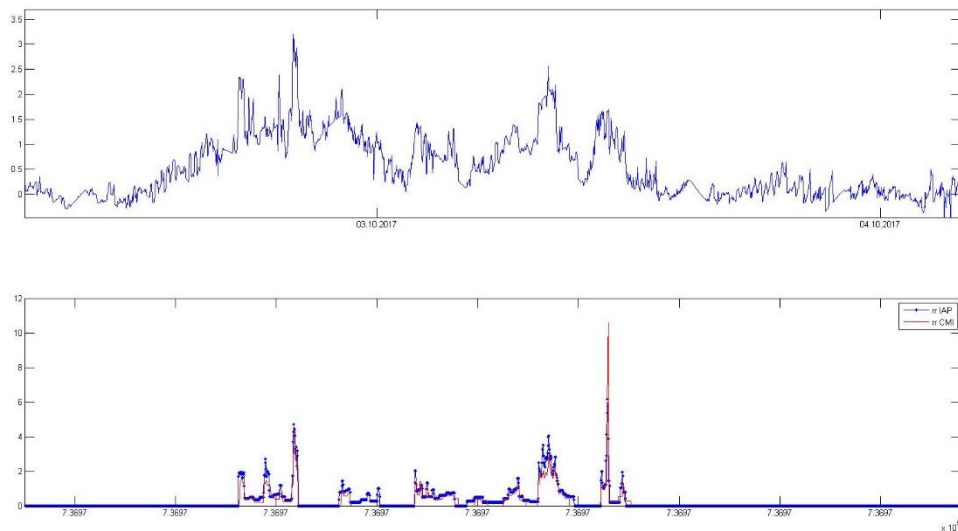
Po provedení výpočtů měrných útlumů pro různé frekvence a jejich různé polarizace a elevace se začaly zkoumat různé závislosti měrného útlumu na jiných veličinách, jako např. intenzita srážek, nebo radarová odrazivost.



Obrázek 52 - Intenzita srážek, vypočtená distrometrem, ze dne 3.10.2017



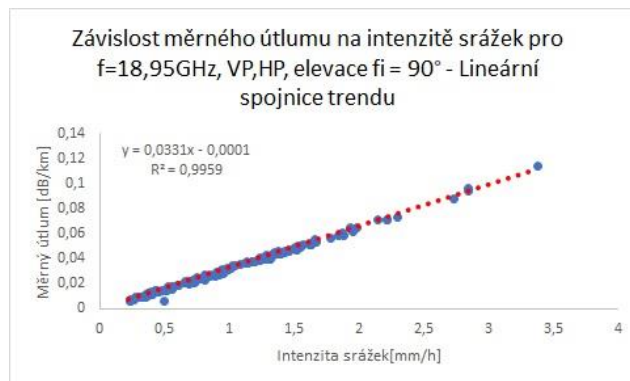
Obrázek 53 - Měrný útlum pro $f = 18,95\text{GHz}$, vypočtený z dat distrometru, ze dne 3.10.2017



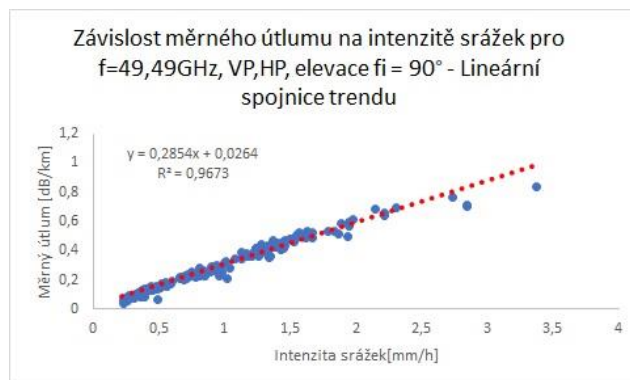
Obrázek 54 - Časový průběh útlumu a intenzity srážek družice Alphasat v pásmu 19GHz pro období 3.10.2017 a okolí

Pro porovnání útlumu vypočteného z měřených dat videodistrometru a změřeného útlumu družicí Alphasat jsme si vybrali opět období jednoho dne. K porovnání došlo i pro případ intenzity srážek z téhož dne. V grafech vypočtených veličin z naměřených dat videodistrometru je vidět, že maximum útlumu ze dne se pohybovalo okolo hodnoty 0,22 dB/km. U družice Alphasat bylo naměřené maximum okolo 3,3 dB/km. Skutečnost, že je rozdíl mezi útlumy tak velký je zapříčiněna tím, že videodistrometr měří pouze lokální srážky a je tím pádem omezen v počtu dat, ze kterých se tvoří útlum podél celého spoje mezi přijímací stanicí (u distrometru) a družicí Alphasat. Co se týče intenzity srážek, zde je viditelná podobnost průběhů obou grafů (intenzita srážek z distrometru a člunkového srážkoměru). Ovšem velikost maxima intenzity

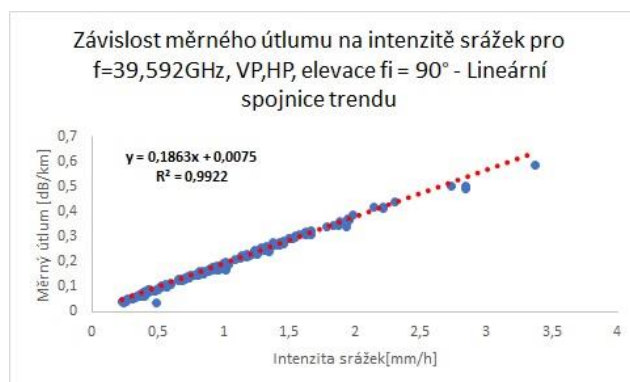
srážek srážkoměru je přibližně 1,8x větší než u videodistrometru, jelikož jsme u tohoto daného výpočtu vynechali násobení již zmíněnou konstantou. Tento problém se v současnosti řeší s rakouským výrobcem videodistrometru (Joaneum Research).



Obrázek 55 - Závislost měrného útlumu na intenzitě srážek_1



Obrázek 56 - Závislost měrného útlumu na intenzitě srážek_2

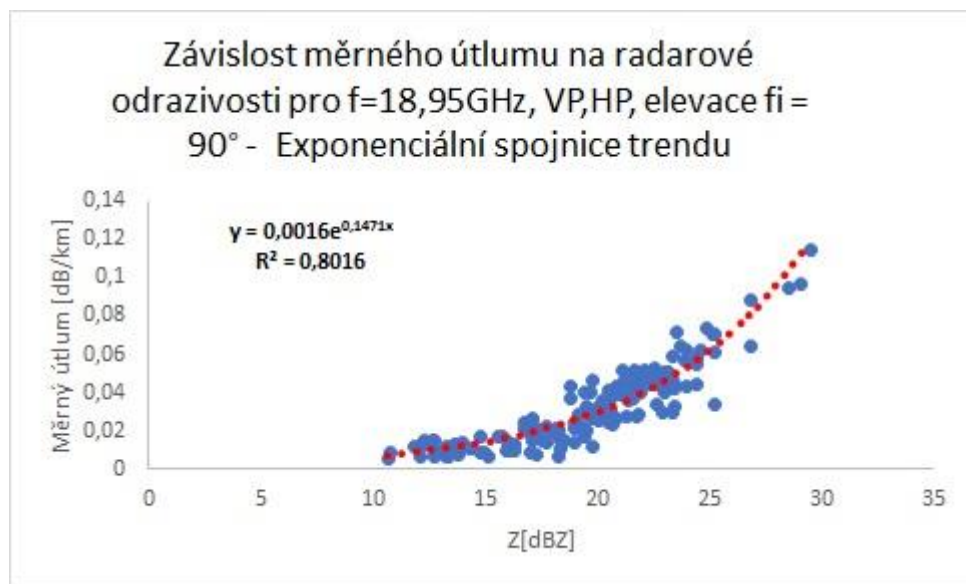


Obrázek 57 - Závislost měrného útlumu na intenzitě srážek_3

V grafech na obrázcích č.52,53,54 můžeme vidět, že závislost měrného útlumu na intenzitě srážek je zpočátku téměř lineární a s navyšující se frekvencí se body začínají vychylovat od proložené přímkou pomocí regrese v programu MS Excell. Uvedené grafy jsou pro stejné polarizace a elevaci. V příloze jsou doloženy grafy těchto závislostí i pro jiné frekvence.

Poslední dva grafy v této příloze jsou věnovány právě závislosti měrného útlumu v pásmech 39 a 49GHz na faktoru radarové odrazivosti v logaritmické formě. Pomocí regrese jsme pro tyto závislosti navrhli exponenciální tvar o korelace mezi 70–80 %.

Další zkoumanou závislostí byl měrný útlum na radarové odrazivosti. Přičemž byla opět provedena regrese a bylo hledáno nejvhodnější proložení. Zde je uveden pouze jeden ilustrační graf, jelikož pro všechny testované frekvence byla určena stejná závislost obou veličin. Lze tedy tvrdit, že z dosažených výsledků je závislost měrného útlumu na radarové odrazivosti exponenciální. Grafy všech počítaných závislostí jsou opět k vidění v příloze.



Obrázek 58 - Závislost měrného útlumu na radarové odrazivosti

ZÁVĚR

V prvním kroku této diplomové práce se převedla data z videodistrometru UFA AV ČR jednotlivých měřených dnů z binární do textové formy, následně dobře zpracovatelné programovacím jazykem MATLAB. Ze začátku jsme konvertovali den po dni pomocí jiným diplomantem (pan Vlasák) upraveným programem HagenNew, ale následně byl vyvinut jednoduchý algoritmus přímo v MATLABU, který výrazně snížil čas vynaložený pro konverzi dat.

Po implementaci dat došlo k deklaraci velikosti jednotlivých velikostních tříd, do kterých byly dešťové kapky dle hodnoty jejich průměru řazeny. Následně byly provedeny výpočty některých relevantních veličin pro jednotlivé kapky, jako je objem, pádová rychlost atd. Tyto výpočty byly provedeny již pro středy jednotlivých tříd zařazených kapek.

Dalším důležitým krokem bylo načítání DSD a počtů kapek do polí, jejichž rozměry byly dány počtem tříd a počtem minut v jednom dni. To znamená, že jsme pro jeden soubor vstupních dat, což bylo období jednoho dne, vypočítali jednodominutová plošná a objemová spektra. Z těchto jednodominutových spekter DSD jsme dále počítali další veličiny jako intenzitu srážek, či kinetickou energii kapek. Při výpočtu intenzity srážek jsme však narazili na problém-velikost intenzity srážek byla 1,8x menší, než tomu tak bylo podle srážkoměru a jiného zapůjčeného distrometru a o něco méně se lišila i od hodnoty dle dodaného softwaru výrobcem videodistrometru. Bohužel se nepodařilo dohledat příčinu tohoto problému, takže jsme byli nuceni tuto konstantu zahrnout do vzorce pro výpočet intenzity srážek a provést násobení tak, aby se velikosti obou průběhů shodovaly. V této záležitosti jsme kontaktovali rakouského výrobce videodistrometru, situace se řeší. Výpočty intenzity srážek, spekter, momentů spekter, rozdělení typu dešťů dle parametrů CS, či W a dalších proměnných jsme dále doplnili o filtry, zmíněné v kapitole výpočtu relevantních veličin.

Po zhotovení výpočtů pro jeden den jsme již mohli přejít ke grafické prezentaci jednotlivých závislostí, přičemž jsme data třídili dle minut, ve kterých pršelo, nebo přes všechny minuty jednoho dne. To nám umožnilo vykreslovat závislosti daných veličin pouze pro celkový čas dešťových srážek z jednoho dne nebo i pro minuty, kdy nepršelo, tedy pro celý měřený den. Samozřejmě když jsme počítali jednodominutová spektra, vznikalo pro jeden den 1440 průběhů plošných a objemových spekter. Pro zjištění celkového spektra pro období jednoho dne jsme tedy museli přikročit k průměrování hodnot těchto spekter v každé třídě za celý den. Výsledkem bylo průměrné plošné, či objemové spektrum pro jeden den.

Tato spektra jsme dále mohli aproximovat (a to opět minutu po minutě) nebo vypočítat celé průměrné denní spektrum. Jelikož je tato diplomová práce založená hlavně na výpočtu DSD, dané aproximace jsme počítali z momentů spektra. To mělo za důsledek poněkud nepřesné proložení bodů spektra aproximovanými funkcemi. Nicméně pro žádané aplikace výsledků byly tyto výpočty relevantní.

Jako poslední přišel na řadu měrný útlum, jehož hodnoty jsme počítali pro různé frekvence, polarizace, hodnoty úhlu elevace a dopředné rozptylové funkce tabelované právě pro tyto údaje. Výsledný průběh měrného útlumu jsme opět graficky prezentovali pouze pro minuty ze dne, ve kterých pršelo, nebo přes celý den, tedy i pro minuty, ve kterých nedocházelo ke srážkám a měrný útlum způsobený hydrometeory, byl tedy nulový nebo velmi malý. Zkoumanou závislostí byl také průběh měrného útlumu na faktoru radarové odrazivosti. Tato i další důležité závislosti byly také převedeny do programu MS Excell, ve kterém byly následně provedeny regrese za účelem zjištění aproximativních rovnic popisujících závislost mezi zkoumanými veličinami. Vhodnost aproximací byla určena korelačními koeficienty. Nutno dodat, že tabelované hodnoty dopředné rozptylové funkce jsou uvedeny pro jiné třídy kapek, než se kterými jsme počítali, proto jsme pro měrný útlum kapky řadili do tříd od 0,5 do 8 mm s krokem 0,5mm. Tím byla práce ztížena.

Provedli jsme také porovnání změřeného útlumu přijímací stanice družice Alphasat a útlumu vypočteného z dat videodistrometru. Z porovnání je vidno, že jsou oba průběhy až na velikost amplitudy velmi podobné. Útlum na družicovém spoji je ovlivněn i deštěm, který distrometr nemohl zaznamenat.

Podle mého názoru jsem zadání mé diplomové práce splnil.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] RÝDL, David. *Zpracování dlouhodobých srážkoměrných údajů (z hlediska denního a sezonního chodu) pro využití v radiokomunikacích*. Pardubice, 2010. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice.
- [2] PETERKA, Jiří. *Mikrovlnné a družicové spoje* [online]. 1992 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.earchiv.cz/a92/a206c110.php3>
- [3] *Mikrovlnný spoj* [online]. In: . [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Mikrovln%C3%BD_spoj#/media/File:Alcoma.bg_Radio_relay_link.jpg
- [4] FIŠER, Ondřej. *Vliv deště na spolehlivost radiokomunikačních prostředků*. Pardubice, 2003. Habilitační práce. Univerzita Pardubice.
- [5] ROUSSEAU, Pierre, Vincent JOLIVET a Djamchid GHAZANFARPOUR. *Realistic real-time rain rendering* [online]. 2006, **30**(4), 507-518 [cit. 2018-05-16]. DOI: 10.1016/j.cag.2006.03.013. ISSN 00978493. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0097849306000859>
- [6] *Oběh vody* [online]. In: . [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Kolob%C4%9Bh_vody#/media/File:Watercycleczechhigh.jpg
- [7] PEŠEK, Jiří. *Význam velikosti dešťových kapek pro odhad odrazu a útlumu mikrovln v dešti*. Praha, 2009. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Stanislav Zvánovec, Ph.D.
- [8] *2DVD* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.distrometer.at/2dvd/>
- [9] VLASÁK, Tomáš. *Zpracování dat videodistrometru pro výzkum šíření vln v elektromagnetickém a optickém pásmu* [online]. Pardubice, 2013 [cit. 2018-05-16]. Bakalářská práce. UPCE.
- [10] FIŠER, Ondřej, Viktor PEK, Jiří PEŠEK, Luboš REJFEK, Vladimír BRÁZDA a Ondřej FIŠER ML. *Rozptyl elektromagnetických vln na dešťových a oblačných kapkách*. Praha. Vědecký článek. UPCE, ČVUT.

- [11] FIŠER a HAJNÝ. Forward scattering functions calculated for frequencies of ITALSAT satellites. Část akademického článku.
- [12] FIŠER, Ondřej. Interakce elektromagnetického pole s dešťovým prostředím se zřetelem na predikci útlumu deštěm družicových spojů v pásmech nad 10 GHz. Praha, 1986. Kandidátská disertační práce. Výzkumný ústav spojů Praha. Vedoucí práce Prof. Ing. Jaroslav Prokop, Csc.
- [13] TOKAY, Ali a David A. SHORT. *Evidence from Tropical Raindrop Spectra of the Origin of Rain from Stratiform versus Convective Clouds* [online]. březen 1996, , 17 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0450%281996%29035%3C0355%3AEFTRSO%3E2.0.CO%3B2>
- [14] FIŠER, Ondřej. The role of particular rain drop size classes on specific rain attenuation at various frequencies with Czech data example. UFA AV ČR, 2002.
- [15] Marshall and Palmer, 1948: The distribution of raindrops with size. *J. Meteorol.*, 5, 165.
- [16] Richter C.(1995): On the parametrisation of Drop Size Distributions - Case Studies with Distrometer , internal report of the Rutherford Appleton Laboratory (UK), 14th December, 1995
- [17] Waldvogel A., 1974: The N_0 jump of raindrop spectra. [J.Atmos.Sci.](#), 31, 1067-1078
- [18] Joss J. and Gori E.G., 1978: Shapes of raindrop size distributions. *J. Appl. Meteorol*, 17,1054-1061.
- [19] Joss J. and Waldvogel A., 1968: The variation of raindrop size distributions at Locarno.Proc. Int. Conf. Cloud. Phys., 369.
- [20] Fišer O. and Hagen M., 1998: Analysis of distrometer data. COST 75 Final Seminar “Advanced Weather Radar Systems,”. Proc.: “14 papers on Precipitation Estimates by Radar and on Analyses for Weather-Forecasting.” Swiss Meteorological Institute, Locarno, 21-33.

- [22] Fišer O., Řezáčová D., Sokol Z., Školoud O. and Pešice P., 1998: An attempt to classify the basic rain types from the rain rate records. COST 255 Workshop "First International Workshop on Radiowave Propagation Modelling for SatCom Services at Ku-band and above", Noordwijk, the Netherlands, 155-157.
- [23] Fišer, O., 2003a "On Rain (DSD) Types Aimed at Radar Reflectivity and Attenuation Calculation. Proceedings of International Workshop on Precipitation in Urban Areas /6/. – Pontresina, 2003., p. 5.
- [24] Fišer, O., 2004: "Z-R (Radar Reflectivity-Rain Rate) Relationships Derived from Czech Distrometer Data." In Proc. of the ERAD Conference, Visby, Sweden, 2004, pp. 233-236.
- [25] Fišer O., 2006: Improved Rain Attenuation Estimation Based on DSD and Radar Data. In Proc. of CNES Workshop on Earth - Space Propagation 2006, [CD-ROM], Toulouse, The Role of DSD and Radio Wave Scattering in Rain Attenuation 19
- [26] Fišer, O., (2007): Selected DSD properties for meteo radar applications and microwave link attenuation in rain. In Wave Propagation in Communication, Microwave Systems and Navigation (WFMN07)- A conference of ITG commission 7.5 "Wave Propagation," pp. 1-4 (CD).
- [27] Jameson, A. R., A. B. Kostinski, 2002: "Spurious power-law relations among rainfall and radar parameters" Q. J. R. Meteorol. Soc. (2002), 128, pp. 2045-2058.
- [28] Řezáčová D., Kašpar M., Novák P., Setvák M., 2007: Fyzika oblaků a srážek (Physics of Clouds and Precipitation), Academia.
- [29] PRUPPACHER, Hans R. a James D. KLETT. *Microphysics of Clouds and Precipitation* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1978 [cit. 2018-05-22]. ISBN 978-90-277-1106-9.

PŘÍLOHY

Příloha A – Grafy závislostí vybraných momentů spektra a kinetické energie kapek.....73

PŘÍLOHA A – GRAFY ZÁVISLOSTÍ VYBRANÝCH MOMENTŮ SPEKTRA, KINETICKÉ ENERGIE KAPEK, INTENZITY SRÁŽEK, MĚRNÉHO ÚTLUMU A FAKTORU RADAROVÉ ODRAZIVOSTI

V této příloze můžeme vidět regresi na vybraných grafech, provedenou v MS EXCELL.

